

Научная статья
УДК 621.31:631.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Валерий Александрович Безик, Дмитрий Александрович Безик, Антон Михайлович Никитин
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

Аннотация. Важной задачей при электроснабжении сельскохозяйственных потребителей является снижение технико-экономических затрат от потерь электроэнергии в распределительных сетях. Изменения характеристик напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии пользователю электрической сети, относящихся к частоте, значениям, форме напряжения и симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения, подразделяют на две категории — продолжительные изменения характеристик напряжения и случайные события. Продолжительные изменения характеристик напряжения электропитания представляют собой длительные отклонения характеристик напряжения от номинальных значений и обусловлены, в основном, изменениями нагрузки или влиянием нелинейных нагрузок. Случайные события представляют собой внезапные и значительные изменения формы напряжения, приводящие к отклонению его параметров от номинальных. Данные изменения напряжения, как правило, вызываются непредсказуемыми событиями. В настоящее время мероприятия направленные на повышение качества электроэнергии в распределительных сетях являются не всегда эффективными, а в некоторых случаях приносят вред. Предлагаемые технические средства и мероприятия не позволяют в достаточной степени снизить потери электрической энергии в электрических сетях сельскохозяйственных предприятий, в результате чего не получается достичь необходимого уровня надежности и качества электрической энергии. При применении технических средств направленных на снижение потерь электрической энергии не учитывается тот факт, что сами технические средства оказывают негативное влияние на электрическую сеть и тем самым дополнительно увеличивают общие потери. В статье приведены результаты измерений основных показателей качества электроэнергии и сделаны предложения по их улучшению.

Ключевые слова: электроснабжение, потери электроэнергии, качество электрической энергии, несимметрия, гармонические колебания, симметрия напряжения, отклонение напряжения, допустимые значения.

Для цитирования: Безик В.А., Безик Д.А., Никитин А.М. Исследование показателей качества электроэнергии сельскохозяйственного предприятия // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 5 (105). С. 53-60.

Original article

RESEARCH OF INDICATORS OF ELECTRIC POWER QUALITY OF AGRICULTURAL ENTERPRISE

Valery A. Bezik, Dmitry A. Bezik, Anton M. Nikitin
Bryansk State Agrarian University, Bryansk Region, Kokino, Russia

Abstract. An important task in the power supply of agricultural consumers is to reduce the technical and economic costs of electricity losses in distribution networks. Changes in the characteristics of the power supply voltage at the point of transmission of electric energy to the user of the electric network, related to frequency, values, voltage shape and voltage symmetry in three-phase power supply systems, are divided into two categories - prolonged changes in voltage characteristics and random events. Long-term changes in the characteristics of the power supply voltage represent long-term deviations of the voltage characteristics from the nominal values and are mainly due to load changes or the influence of nonlinear loads. The random events are sudden and significant changes in the shape of the voltage, leading to a deviation of its parameters from the nominal ones. These voltage changes are usually caused by unpredictable events. Currently, measures aimed at improving the quality of electricity in distribution networks are not always effective, and in some cases they are harmful. The proposed technical means and measures do not sufficiently reduce the loss of electrical energy in the electrical networks of agricultural enterprises, as a result of which it is not possible to achieve the required level of reliability and quality of electrical energy. When using technical means aimed at reducing electrical energy losses, the fact that the technical means themselves have a negative impact on the electrical network and thereby further increase the total losses is not taken into account. The article presents the results of measurements of the main indicators of electricity quality, and the suggestions are made for their improvement.

Key word: power supply, loss of electricity, quality of electrical energy, asymmetry, harmonic oscillations, voltage symmetry, voltage deviation, permissible values.

For citation: Bezik V.A., Bezik D.A., Nikitin A.M. Research of indicators of electric power quality of agricultural enterprise // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2024. №5 (105). 53-60.

Введение. Важной комплексной задачей при электроснабжении сельского хозяйства для системы электроснабжения является снижение технико-экономических затрат. Одним из способов достижения данной задачи является процесс повышения надежности и качества системы электроснабжения в целом. Для достижения поставленной цели важны мероприятия направленные на снижение потерь и ещё немаловажным является рациональное использование полученной из распределительной сети эклектической энергии [1,2].

Многими учеными изучаются проблемы связанные с отклонением основных качественных показателей электроэнергии от нормы, а так же снижения надежности существующих электрических сетей и новых проектируемых электрических сетей. Несмотря на вышесказанное, вопросы, связанные с повышением надежности и качества электрической энергии рассмотрены не в полном объеме [1-9]. Проанализировав применяемые в настоящее время технические средства и мероприятия направленные на повышения надежности и качества электроснабжения сельскохозяйственных предприятий можно сделать вывод, что большая часть данных технические средств и мероприятий являются трудоемкими и экономически затратными. Предлагаемые технические средств и мероприятия не позволяют в достаточной степени снизить потери электрической энергии в электрических сетях сельскохозяйственных предприятий, в результате чего не получается достичь необходимого уровня надежности и качества электрической энергии. Предлагаемые технические средства и мероприятия для распределительных сетей напряжением 0,4 кВ выбираются по величине токовой нагрузки сельскохозяйственного предприятия. При применении технические средств направленных на снижение потерь электрической энергии не учитывается тот факт, что сами технические средства оказывают негативное влияние на электрическую сеть и дополнительно увеличивают общие потери.

Таким образом, окончательный выбор мероприятий может быть сделан только на основании исследований показателей качества электроэнергии. Для этого правилами технической эксплуатации электроустановок рекомендуется проведение измерений качества электрической энергии не реже 1 раза в 2 года (ПТЭЭП, п.1.2.6).

Цель исследования. Поэтому целью работы было исследование электрических сетей АПХ «ОХОТНО» с разработкой более эффективных технических средств и мероприятий, направленных на повышение уровня надежности и показателей качества электрической энергии в рассматриваемых сетях.

Методика исследований. Измерение основных параметров распределительной сети, было произведено в разных точках сети исследуемого предприятия АПХ «ОХОТНО» в соответствии с требованиями ГОСТ 33073-2014 и ГОСТ 30804.4.30-2013 [1,2].

Измерение и оценка показателей качества электроэнергии производилась в точки с напряжением 10 кВ и в точке с напряжением 0,4 кВ с помощью прибора марки CIRCUTOR S.A.AR6. Измерения показателей качества электроэнергии проводились при настройках прибора по следующим основным параметрам: тип системы – четырехпроводная с тремя фазами; запись данных с интервалом в пять секунд. Значение номинального напряжения в рассматриваемой сети составляет 380 В. Измерительный прибор CIRCUTOR, настроен на измерение основных параметров энергетической системы: фазные и линейные значение напряжения в сети - $U_1, U_2, U_3, U_{12}, U_{23}, U_{13}$ (В); силы тока - I_1, I_2, I_3 (А);, напряжения и тока в нулевом проводнике; небаланса нулевой и обратной последовательности - k_0, k_2 (%); мощностного коэффициента – $\cos\varphi$; перенапряжения, провала и прерывания напряжения.

Результаты измерения и их обсуждение.

Отклонение частоты. Номинальное значение частоты напряжения электропитания в электрической сети равно 50 Гц. Для этого показателя установлены следующие нормы: отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю. Результаты измерений частоты на исследуемом объекте находится в пределах ГОСТа (рис. 1).

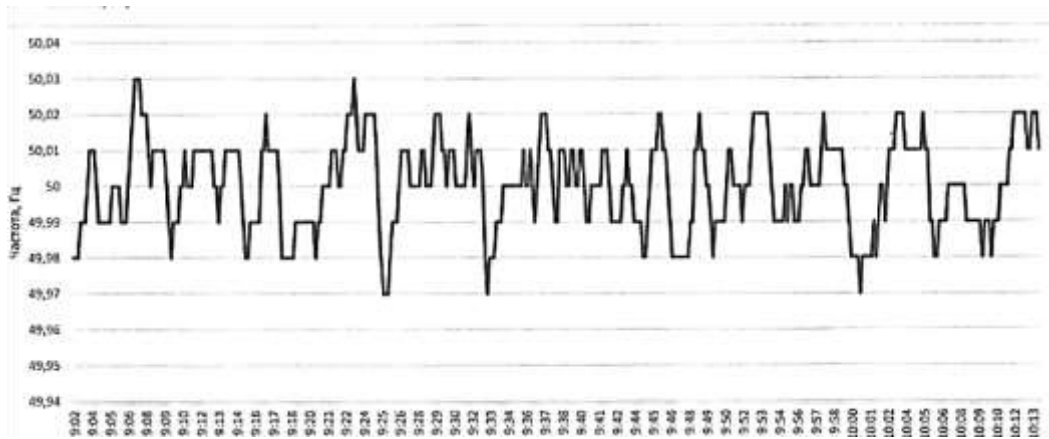


Рисунок 1 - График результатов измерений частоты

Отклонения напряжения. Отклонение напряжения характеризуется показателем установившегося отклонения напряжения. Нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения δU_u на выводах приемников электрической энергии равны соответственно $\pm 10\%$ от номинального напряжения электрической сети по ГОСТ 32144-2013 [3]. По полученным данным с помощью измерительного прибора CIRCUTOR можно сделать следующий вывод: в сети 0,4 кВ в некоторых случаях уровень напряжения выходит за допустимые пределы, что является недопустимым (рис. 2, 3).

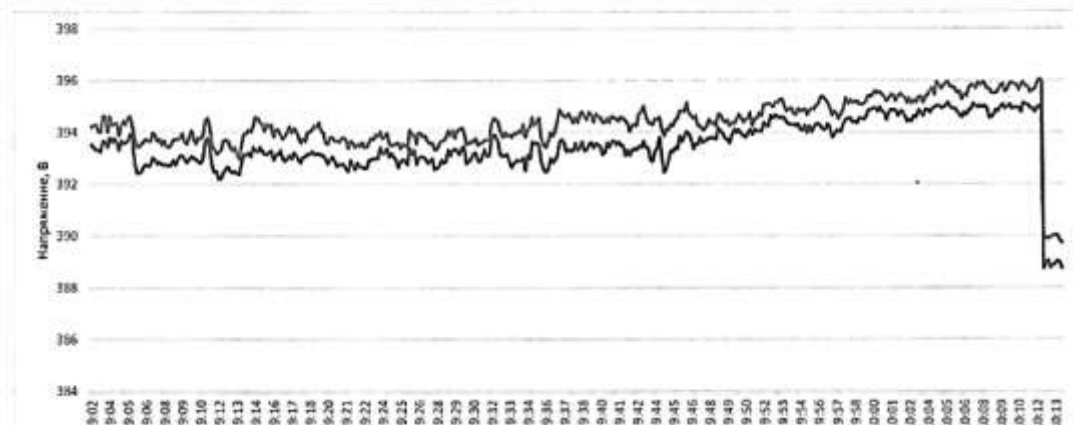


Рисунок 2 - Величина отклонения напряжения по фазам

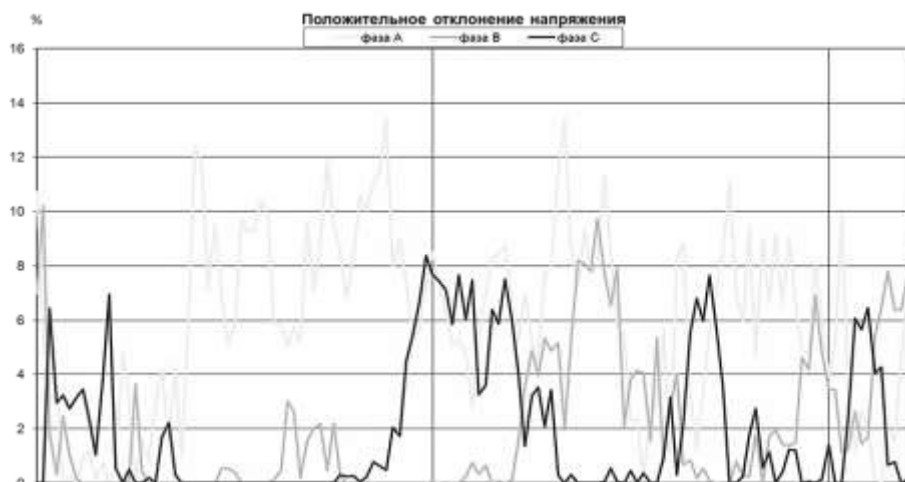


Рисунок 3 - Положительные отклонения напряжений в фазах

Колебания напряжения и фликер. Показателями качества электроэнергии, относящимися к колебаниям напряжения, являются кратковременная доза фликера Pst , измеренная в интервале времени 10 мин, и длительная доза фликера Plt . Исходя из полученных данных кратковременная и длительная доза фликера периодически выходила за рамки допустимых значений (рисунок 4 и 5).

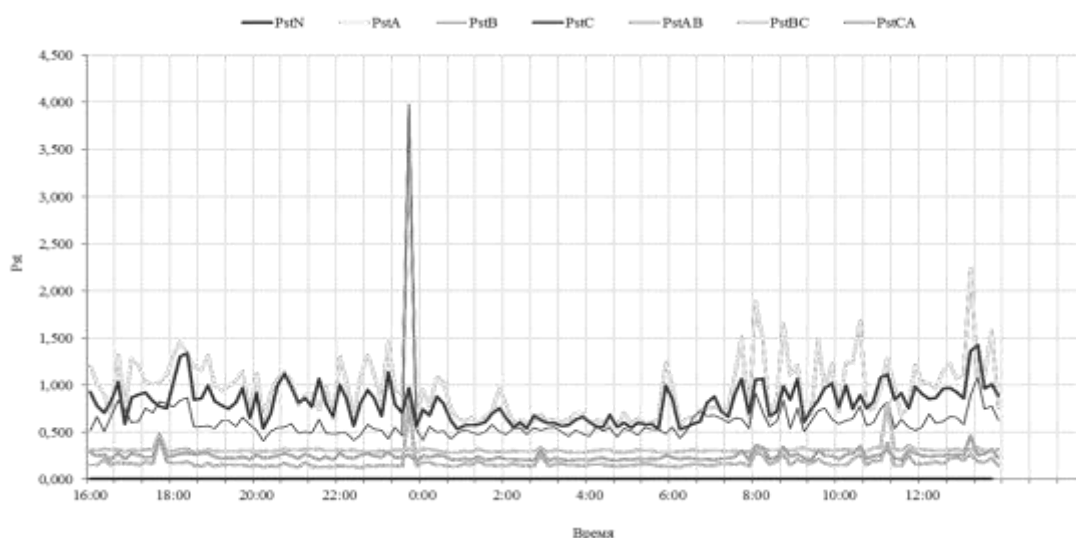


Рисунок 4 - График измеренных значений кратковременного значения дозы фликера

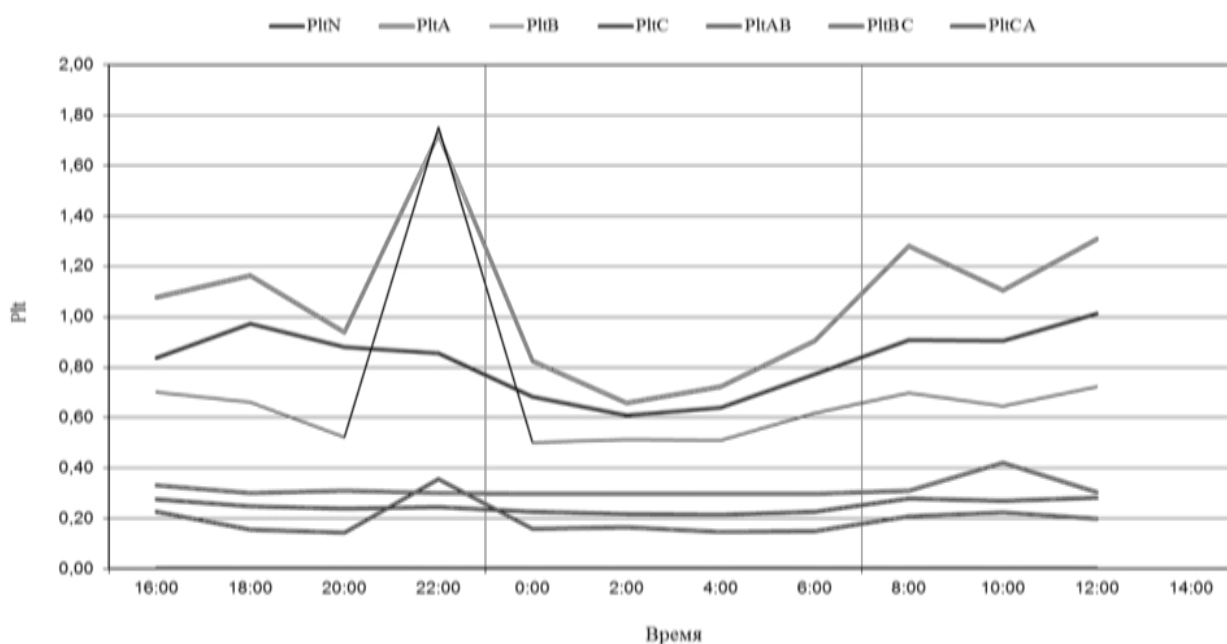


Рисунок 5 - График измеренных значений длительного значения дозы фликера

Несинусоидальность величины напряжения. Показателями КЭ, относящимися к гармоническим составляющим напряжения являются: значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка и значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

По результатам анализа коэффициентов гармонических составляющих напряжения все значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , а так же значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ не превышают значений установленных в ГОСТ 32144-2013 [3]. Результаты измерений гармонических колебаний для нечетных гармоник сводим в таблицу 1 и на рисунке 6.

Таблица 1 - Величина отклонений гармонических колебаний.

Номер исследуемой гармоники	Допустимое значение, %	Фаза А, %	Фаза В, %	Фаза С, %	Нейтральный провод, %	Примечание
3	5	0	0	0	0	Не превышает
5	6	5,1	5	5	0	Не превышает
7	5	3,5	3	3,2	0	Не превышает
9	1,5	0	0,5	0	0	Не превышает
11	3,5	4	4,1	4,5	0	Превышает
13	3	2,9	2,5	3	0	Превышает
15	0,3	0	0,5	0	0	Превышает

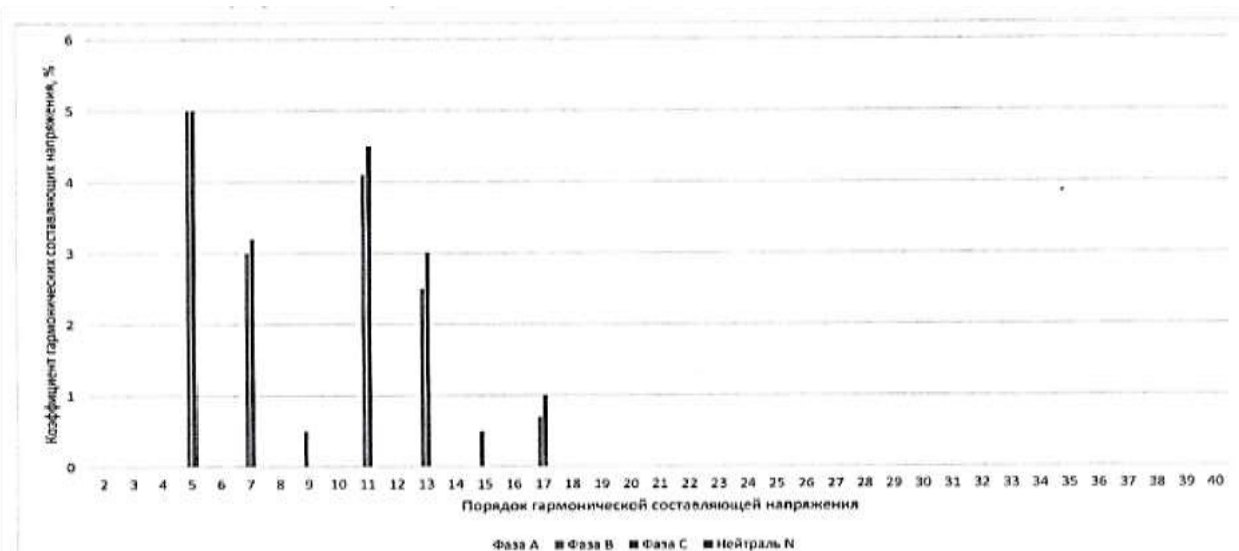


Рисунок 6 - Спектральный анализ гармоник фазных напряжений

Несимметрия систем с трехфазным напряжением. Основными показателями качества электроэнергии, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} .

Согласно нормам качества электроэнергии ГОСТ 32144-2013, значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой K_{0U} последовательности, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю, и не должны превышать 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю. По расчетным данным, определены отклонения от норм ГОСТ 32144-2013 (рис. 7). Из выше сказанного можно сделать вывод о том, что энергетическая система исследуемого объекта нуждается в ряде мероприятий позволяющих уменьшить или полностью убрать из энергосистемы несимметрию.

Одной из основных проблем возникновения несимметрии в трехфазной сети является ненормированное распределение потребителей электроэнергии по фазам распределительной сети и использование устройств с несимметричными характеристиками. Из-за несимметрии снижается энергоэффективность устройств компенсации и регулирования параметров распределительной сети, сокращается срок службы и мощность электродвигателей, систем освещения и другой электротехнической аппаратуры [5-8].

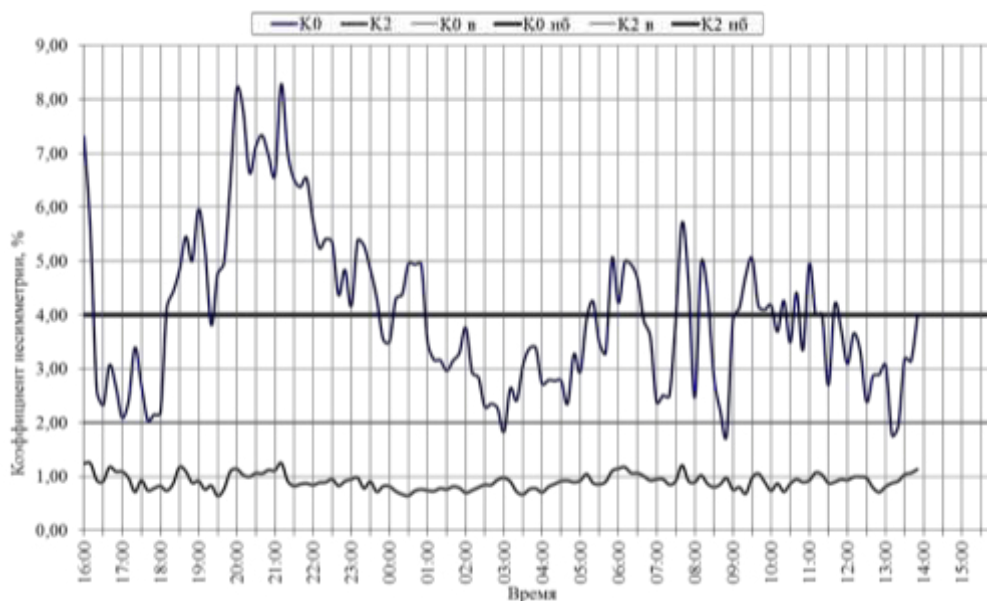


Рисунок 7 - График несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательности

Несимметрия напряжений по нулевой и обратной последовательности отрицательно влияет на релейную защиту и автоматику, что может привести к выходу из строя энергетической аппаратуры, и в результате чего, могут возникнуть аварийные ситуации.

Перенапряжения и провалы напряжения. В соответствии с требованиями нормативных документов провал напряжения рассматривается как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью. Длительность провала напряжения может быть до 1 мин. Длительность перенапряжения может быть до 1 мин.

По результатам измерений уровень провалов напряжения и перенапряжений находится в допустимых пределах согласно ГОСТ 32144-2013.

Мероприятия, направленные на повышение качества электроэнергии в распределительных сетях рассматриваемого предприятия. По полученным данным, качества электроэнергии, исследуемого предприятия были обнаружены отклонения от норм. Особенно актуальными являются отклонения норм качества электроэнергии связанные с отклонением гармонических колебаний, отклонения величины напряжения, отклонения величины фликера и несимметрия.

Мероприятий направленных на решение данных отклонения от норм качества электроэнергии в настоящее время достаточно много, но наиболее подходящим к данному предприятию будет являться применение устройства симметрирования трехфазных четырехпроводных сетей с нулевым проводником. Данное устройство содержит три конденсатора соединенные «звездой», лучи которой подключаются к питающей сети пофазно и катушку индуктивности, подключенную между точкой соединения конденсаторов и нулевым проводником. Устройство не имеет возможности регулирования, что не дает возможности точной настройки под необходимые параметры, поэтому применение данного устройства будет неэффективным. Для повышения качества электроэнергии в распределительных четырехпроводных сетях и снижения несимметрии необходимо использовать устройства симметрирования с возможностью регулирования параметров.

Предлагается устройство (рис. 8), с функцией автоматического регулирования и управления основными параметрами за счет использования релейной аппаратуры и устройств автоматики [5]. Данное устройство состоит из следующих основных элементов: индуктивного элемента и емкостных элементов, а также автоматическое регулирование, работающее на основании величины тока в нулевом проводе.

Устройство состоит из двух ступеней регулирования мощности. Первая ступень устройства регулирования мощности состоит из ёмкостей C1, C3, C5 и части витков катушки индуктивности L до дополнительного вывода к контактам KM2. Вторая ступень устройства регулирования мощности состоит из ёмкостей C2, C4, C6 и всего количества витков катушки индуктивности L.

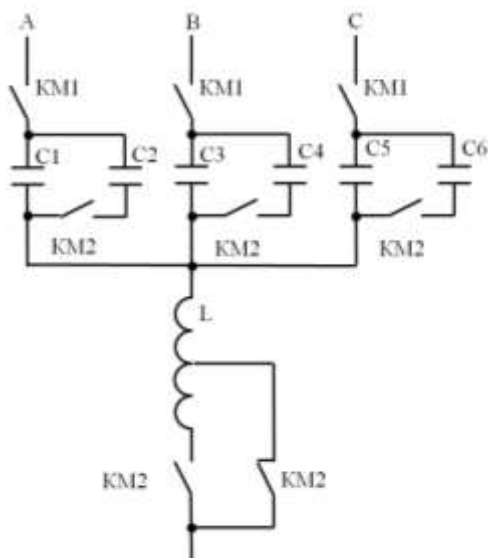


Рисунок 8 - Устройство симметрирования трехфазных четырехпроводных сетей с нулевым проводником

Рассчитаем основные параметры устройства симметрирования трехфазных четырехпроводных сетей с нулевым проводником для исследуемой распределительной сети 0,4 кВ. Условиями для расчета является измеренное максимальное значение тока нулевого проводника $I_{\max.N} = 23,17$ А за период времени t в течении которого проводились исследования. Значения токов в фазах $I_A=10,76$ А, $I_B=9,5$ А, $I_C=34,8$ А.

Рассчитаем среднее значение тока:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} = \frac{10,76 + 9,5 + 34,8}{3} = 18,35 \text{ А} \quad (1)$$

Рассчитаем мощность фазы симметрирующего устройства:

$$S_{\Phi} = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{cp} = 3 \cdot 328 \cdot 18,35 = 18059,68 \text{ ВА} = 18,05 \text{ кВА} \quad (2)$$

Значения коэффициентов мощности в распределительной сети выбираем $\cos \varphi_n = 0,8$ и $\cos \varphi_k = 0,95$, соответственно значения $\sin \varphi_n = 0,6$ и $\sin \varphi_k = 0,312$. Рассчитаем необходимую мощность емкостных элементов по формуле:

$$Q_C = S_{\Phi} \cdot (\sin \varphi_n - \sin \varphi_k) = 18,05 \cdot (0,6 - 0,312) = 5,19 \text{ кВАр} \quad (3)$$

Тогда мощность одной конденсаторной батареи будет равна:

$$Q_{C1} = Q_C / 3 = 5,19 / 3 = 1,73 \text{ кВАр} \quad (4)$$

Рассчитаем сопротивление емкостной батареи и катушки индуктивности:

$$X_C = \frac{U_{\Phi}^2}{Q_{C1}} = \frac{238^2}{3938} = 39,4 \text{ Ом} \quad X_L = \frac{X_C}{3} = \frac{39,4}{3} = 13,3 \text{ Ом} \quad (5)$$

Определим ток нулевой последовательности в исследуемой сети:

$$I_{0*} = K_{0i} / 2, \quad (6)$$

Следовательно, при максимально допустимом значении коэффициента тока нулевой последовательности $K_{0i} = 0,45$, ток нулевой последовательности будет равен:

$$I_0 = K_{0i} \cdot I_{cp} / 2 = 0,45 \cdot 18,35 / 2 = 4,12 \text{ А}, \quad (7)$$

Тогда определим мощность катушки индуктивности:

$$Q_L = U_L \cdot I_0 = 3 \cdot X_L \cdot I_{0max}^2 = 3 \cdot 13,3 \cdot 4,12^2 = 677,27 \text{ Вар} = 0,677 \text{ кВАр} \quad (8)$$

Рассчитаем величину индуктивности катушки индуктивности:

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{13,3}{3,14} = 0,0424 \text{ Гн}. \quad (9)$$

Тогда сумма установленной мощности всех элементов составит:

$$S_y = 3 Q_{C1} + Q_{Lmax} = 3 \cdot 1,73 + 0,677 = 5,86 \text{ кВАр}. \quad (10)$$

Из расчетов, индуктивность катушки составляет $L=0,0424$ Гн, а общая емкость батареи составляет $S_y = 5,86$ кВАр. С учетом простоты конструкции предлагаемого устройства, низкой стоимости и его эффективности срок окупаемости будет небольшим. Данное устройство может найти широкое применение в распределительных сетях 10/0,4 кВ для повышения показателей качества электроэнергии и снижения потерь в распределительных сетях, а соответственно к экономии энергоресурсов.

Заключение. Экспериментальное исследование показателей качества электроэнергии на сельскохозяйственном предприятии выявили наличие ряда проблем в системе электроснабжения: превышение допустимых значений высших гармоник напряжения и тока, недопустимое длительное отклонение напряжения, несимметрия напряжения и тока.

Наиболее эффективным способом повышения показателей качества электроэнергии на сельскохозяйственном предприятии является установка для выравнивания симметрии фаз с возможностью автоматического регулирования мощностью данного устройства, для оптимальной настройки под конкретную распределительную сеть. Расчеты, проводимые по измеренным данным на примере исследуемой электрической сети, показали высокую эффективность предлагаемого устройства для наиболее влияющего режима несимметрии напряжений и токов на качество электроэнергии.

Список источников

1. ГОСТ 33073-2014. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения". Введ. 08-12-2014 № 1948-ст.
2. ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008). Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 2014-01-01.
3. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 22-07-2013. № 400-ст.
4. Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Качество электрической энергии и управление им: учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также для специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией систем электроснабжения. Вологда: ООО "Изд-во "Инфра-Инженерия", 2024. 104 с.
5. Парсентьев О.С. Качество электрической энергии: учеб. пособие. Луганск: НПК Перспектива, 2024. 306 с.
6. Чижма С.Н. Качество электрической энергии и параметры режимов электроэнергетических систем: учеб.-метод. пособие. Калининград: Балтийский федеральный ун-т им. Иммануила Канта, 2022. 68 с.

7. Охотников М.Н., Плехов А.С., Сидоров М.В. Передача и качество электрической энергии. Нижний Новгород: Нижегородский государственный техн. унт. им. Р.Е. Алексеева, 2019. 153 с.
8. Макашева С.И., Пинчуков П.С. Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление / Дальневосточный государственный ун-т путей сообщения, кафедра «Системы электрооборудования». Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2020. 114 с.
9. Наумов И.В., Лещинская Т.Б. Электроснабжение сельского хозяйства: учеб. М.: ТРАНСЛОГ, 2015.
10. Повышение качества электрической энергии в АПК применением трансформаторов со специальными схемами соединения обмоток / М.А. Прищепов, И.В. Протосовицкий, В.М. Збродыга, А.И. Зеленкевич // Энергосбережение - важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 65-летию агроэнергетического факультета и 100-летию И.Ф. Кудрявцева, Минск, 21–22 декабря 2022 года. Мн.: Белорусский государственный аграрный техн. ун-т, 2022. С. 17-23.
11. Туев Д.Д. Проблемы качества электрической энергии // E-Scio. 2022. № 10 (73). С. 285-289.
12. Структура времени определения источника искажений показателей качества электрической энергии и программно-аппаратный комплекс для его сокращения / М.В. Бородин, А.В. Виноградов, А.В. Букреев, А.А. Панфилов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 6. С. 29-41.

Информация об авторах:

В.А. Безик – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации, физики и математики, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Д.А. Безик – кандидат технических наук, доцент, директор института энергетики и природопользования, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

А.М. Никитин - кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехнологий, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Information about the authors:

V.A. Bezik - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation, Physics and Mathematics, Bryansk State Agrarian University.

D.A. Bezik - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Energy and Environmental Management, Bryansk State Agrarian University.

A.M. Nikitin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering, Bryansk State Agrarian University.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17.06.2024; одобрена после рецензирования 25.09.2024, принята к публикации 30.09.2024 .

The article was submitted 17.06.2024; approved after reviewing 25.09.2024; accepted for publication 30.09.2024 .

© Безик В.А., Безик Д.А., Никитин А.М.