

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Г. И. Янукович**

**ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕСИММЕТРИИ  
И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ  
В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ**

Минск  
БГАТУ  
2013

УДК 631.371:621.31

**Янукович, Г. И.** Пути улучшения показателей несимметрии и несинусоидальности напряжения в сельскохозяйственных электроустановках / Г. И. Янукович. – Минск : БГАТУ, 2013. – 216 с. : ил. – ISBN 978-985-519-622-9.

Изложены основные положения государственного стандарта на качество электрической энергии (ГОСТ 13109–97), приведены показатели качества электроэнергии и требования, предъявляемые к ним. Дан анализ способов повышения качества напряжения. Приведены теоретические и экспериментальные результаты исследования трансформаторов, рекомендованных кафедрой электроснабжения для повышения качества напряжения.

Предназначено для научных работников, руководителей и специалистов сельскохозяйственных предприятий, преподавателей и студентов учреждений образования

Табл. 3. Ил. 59. Библиогр.: 188 назв.

*Рецензенты:*

профессор кафедры «Электрические системы»  
УО «Белорусский национальный технический университет»,  
доктор технических наук, профессор *М. А. Короткевич*;  
проректор по научной работе  
УО «Белорусский государственный аграрный  
технический университет»,  
доктор технических наук *М. А. Прищепов*

ISBN 978-985-519-622-9

© БГАТУ, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ПРОБЛЕМА НЕСИММЕТРИИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ.....	7
1.1. Анализ качества напряжения в сельских электрических сетях 380/220 В.....	7
1.2. Причины возникновения несимметрии и несинусоидальности напряжения .....	10
1.3. Влияние несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу потребителей.....	13
1.3.1. Влияние отклонений напряжения.....	13
1.3.2. Влияние несимметрии напряжений.....	20
1.3.3. Влияние несинусоидальности напряжения .....	23
1.4. Способы симметрирования напряжения в низковольтных электрических сетях .....	28
1.5. Способы минимизации высших гармоник .....	31
1.6. Влияние схем соединения обмоток трансформаторов на качество напряжения .....	35
2. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ СИММЕТРИРУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ .....	43
2.1. Методика исследования несимметричной работы трансформаторов .....	43
2.2. Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль–разомкнутый треугольник» ( $Y/Y_n$ –разомкнутый треугольник) .....	44
2.2.1. Общий случай несимметрии .....	44
2.2.2. Расчет однофазного тока короткого замыкания.....	65
2.2.3. Экспериментальные исследования симметрирующей способности трансформатора $Y/Y_n$ –разомкнутый треугольник .....	66
2.2.3.1. Задачи и методика экспериментальных исследований.....	66
2.2.3.2. Экспериментальное определение напряжений с первичной и вторичной сторон трансформатора и тока в нулевом проводе для схем «звезда–звезда–нуль» ( $Y/Y_n$ ) и $Y/Y_n$ –разомкнутый треугольник при несимметричной нагрузке фаз .....	68
2.2.3.3. Исследование зависимости фазного напряжения высокой и низкой сторон трансформатора для схем соединения $Y/Y_n$ и $Y/Y_n$ –разомкнутый треугольник от тока нагрузки .....	68
2.2.3.4. Исследование зависимости коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности .....	74
2.2.3.5. Исследование сопротивления нулевой последовательности трансформатора.....	79
2.3. Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль с симметрирующим устройством» ( $Y/Y_n$ СУ).....	88
2.3.1. Условия анализа несимметричной работы трансформатора .....	88
2.3.2. Общий случай несимметрии.....	89
2.3.3. Экспериментальные исследования симметрирующей способности трансформатора $Y/Y_n$ СУ.....	99
2.3.4. Исследование зависимости коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности трансформатора $Y/Y_n$ СУ .....	103
2.3.5. Сопротивление нулевой последовательности трансформатора $Y/Y_n$ СУ .....	105
2.3.6. Исследование влияния симметрирующего устройства на нагрев трансформатора $Y/Y_n$ СУ .....	110
2.4. Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда–треугольник с зигзагом» ( $Y/\Delta$ с зигзагом) .....	118
2.4.1. Область применения трансформатора .....	118
2.4.2. Работа трансформатора при несимметричной нагрузке фаз .....	124
2.4.2.1. Общий случай несимметрии .....	124
2.4.2.2. Экспериментальные исследования симметрирующей способности трансформатора $Y/\Delta$ с зигзагом.....	137
3. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИММЕТРИРУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ТРАНСФОРМАТОРОМ $Y/Y_n$ .....	142
3.1. Задачи и методика исследования .....	142
3.2. Экспериментальное определение параметров и исследование их зависимостей при параллельной работе трансформаторов на несимметричную нагрузку.....	143
3.3. Коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности при параллельной работе	

пар трансформаторов $Y/Y_n$ , $Y/Y_n$ и $Y/Y_n$ , $Y/Y_n$ -разомкнутый треугольник .....	148
3.4. Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами со схемами соединения обмоток $Y/Y_n$ -разомкнутый треугольник и $Y/Y_n$ при несимметричной нагрузке .....	151
4. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКЕ .....	153
4.1. Общие замечания.....	153
4.2. Характеристика спектра фазных напряжений вторичной стороны трансформаторов $Y/Y_n$ -разомкнутый треугольник и $Y/Y_n$ СУ при работе их на нелинейную нагрузку.....	154
4.3. Экспериментальные исследования способности трансформаторов $Y/Y_n$ -разомкнутый треугольник и $Y/Y_n$ СУ улучшать форму кривой напряжения .....	159
5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ .....	166
5.1. Конструктивное исполнение трансформаторов.....	166
5.2. Методика расчета конструктивных параметров и технических характеристик трансформаторов .....	169
5.3. Заводские и производственные испытания промышленных образцов симметрирующих трансформаторов.....	170
5.4. Техничко-экономическая оценка эффективности применения трансформаторов для улучшения показателей несимметрии и несинусоидальности напряжения в сельскохозяйственных электроустановках.....	175
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	180
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	195

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в хозяйствах республики имеется большое количество животноводческих предприятий, производящих продукцию на промышленной основе. Происходит всесторонняя автоматизация и комплексная механизация производственных процессов. Растет энерговооруженность сельскохозяйственного производства, а вместе с ней и энергопотребление.

С ростом производственной нагрузки растет и коммунально-бытовая нагрузка.

Одновременно с быстрым ростом потребления электрической энергии повышаются требования к надежности электроснабжения потребителей, и все более остро ставится вопрос повышения ее качества, так как от качества электрической энергии зависит и качество производимой продукции.

Качество электрической энергии характеризуется рядом показателей, при которых потребители могут нормально работать.

В Республике Беларусь, как и в ряде других стран СНГ, качество электроэнергии нормировано ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

В данной монографии приведены показатели и нормы качества электрической энергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в соответствии с указанным стандартом. Представлена информация ряда авторов о влиянии качества электрической энергии на работу потребителей. В краткой форме изложены известные способы повышения качества электрической энергии. Подробно рассмотрены предложенные и исследованные на кафедре электроснабжения Белорусского государственного аграрного технического университета трансформаторы со схемами соединения обмоток «звезда-звезда-нуль-разомкнутый треугольник», «звезда-звезда-нуль с симметрирующим устройством», «звезда-треугольник с зигзагом», улучшающие показатели несимметрии и несинусоидальности напряжения. Приведены их теоретические и экспериментальные исследования. Показана экономическая эффективность использования их в сельских электрических сетях.