

Таблица 4 – Максимальные значения показателей искажения синусоидальности токов за период измерений (по ГОСТ ИЕС 61000-3-2-2021 для оборудования класса «А», не относящегося к симметричному трехфазному оборудованию, с током до 16А на фазу)

Значения коэффициентов n-ой гармонической составляющей токов $K_{I(n)}$ , %								
Номер гармоники	Измеренное значение	Норма по ГОСТ	Номер гармоники	Измеренное значение	Норма по ГОСТ	Номер гармоники	Измеренное значение	Норма по ГОСТ
2	1,21	1,8	15	4,05	0,15	28	0,66	0,23
3	13,88	2,3	16	0,49	0,23	29	4,19	0,15
4	1,26	0,43	17	3,44	0,15	30	0,96	0,23
5	7,71	1,14	18	0,68	0,23	31	0,99	0,15
6	0,73	0,3	19	2,21	0,15	32	0,54	0,23
7	5,09	0,77	20	0,64	0,23	33	1,33	0,15
8	0,9	0,23	21	2,63	0,15	34	0,56	0,23
9	5,99	0,4	22	0,81	0,23	35	3,78	0,15
10	0,85	0,23	23	5,0	0,15	36	0,55	0,23
11	4,79	0,33	24	0,64	0,23	37	2,48	0,15
12	0,71	0,23	25	4,41	0,15	38	0,42	0,23
13	8,98	0,21	26	0,72	0,23	39	1,47	0,15
14	0,96	0,23	27	2,55	0,15	40	0,41	0,23

### Заключение

Результаты измерений качества напряжения показали, что показатели отклонения напряжения электропитания от номинального/согласованного значения, величины коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям, величины суммарного коэффициента гармоник напряжения, находились в допустимых пределах.

Значения коэффициентов определенных гармоник напряжения, суммарного коэффициента гармоник тока, значения коэффициентов 2-40 гармоник тока, выходили за допустимые пределы, что может явиться причиной перегрева лабораторного оборудования и ложных срабатываний микропроцессорной релейной защиты. Поэтому может быть рекомендовано проведение мероприятий, внедрение технических средств повышения качества напряжения, ограничения уровня высших гармоник.

### Литература

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. (EN 50160:2010, NEQ). - Взамен ГОСТ 13109-97; введ. 2016-04-01. - Минск : Госстандарт, 2015. - 20 с.

УДК 621.311:621.315

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Мамедов<sup>1</sup> Т.А., Шелягина<sup>2</sup> А.Ю., Загинайлов<sup>2</sup> В.И., д.т.н., профессор

<sup>1</sup>ООО «Объединенная электросетевая компания»,

<sup>2</sup>Российский государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва

**Введение:** Сельскохозяйственные потребители необходимую электрическую энергию (ЭЭ) получают, как правило, по воздушным ЛЭП низкого напряжения. Воздушные ЛЭП низкого напряжения сооружаются с использованием проводов марки А и самонесущих изолированных проводов СИП 2. СИП обладает преимуществами перед неизолированными алюминиевыми проводами: обеспечивает электробезопасность проведения работ, в том числе и под напряжением; не происходит поражение электрическим током, так как у них токоведущая жила покрыта изоляцией; провода обладают повышенной прочностью на разрыв, что позволяет увеличить длину пролёта; снижаются затраты на эксплуатационные

расходы, так как отпадает необходимость в расчистке трасс; снижается возможность хищения энергии при несанкционированном подключении электроприемников к ЛЭП.

При проектировании систем электроснабжения возникает необходимость в определении параметров ЛЭП низкого напряжения: передаваемой мощности, длины и сечения линии, сравнения ЛЭП по потерям напряжения и мощности.

Целью работы является разработка, в электронной программе Electronics Workbench, схемы измерения параметров одной фазы симметричной трёхфазной ЛЭП с нагрузкой, расположенной в конце ЛЭП (участка ЛЭП), с глухозаземленной нейтралью и сравнение ЛЭП, выполненных различными проводами по потерям напряжения и мощности.

**Материалы и методы.** В качестве методов использованы законы линейных электрических цепей электротехники и моделирование электрических сетей в электронной программе Electronics Workbench.

Измерение параметров одной фазы симметричной трёхфазной ЛЭП с глухозаземленной нейтралью и нагрузкой, расположенной в конце ЛЭП (участка ЛЭП) проведено на двух ЛЭП, длиной:  $l = 1$  км, одна из которых выполнена алюминиевым неизолированным проводом марки А сечением 50 мм.кв, другая - самонесущим изолированным проводом СИП 2, такого же сечения.

**Результаты и обсуждение.** Учитывая, что сопротивления ЛЭП (активное  $R_{л}$  и индуктивное  $X_{л}$ ) и нагрузки (активное  $R_{н}$  и индуктивное  $X_{н}$ ) соединены последовательно и подключены к шинам силового трансформатора 10/0,4 кВ), напряжением  $U_c = 230$  В и частотой  $f = 50$  Гц, в электронной программе Workbench разработана схема измерения параметров одной фазы трехфазной ЛЭП с нагрузкой в конце ЛЭП (рис.1), основанная на изменении действующего значения тока сети (ЛЭП, нагрузки):  $I = \frac{U_c}{Z_c} = \frac{U_c}{\sqrt{(R_{л} + R_{н})^2 + (X_{л} + X_{н})^2}}$ , зависимо от величины полного сопротивления сети  $Z_c$ .

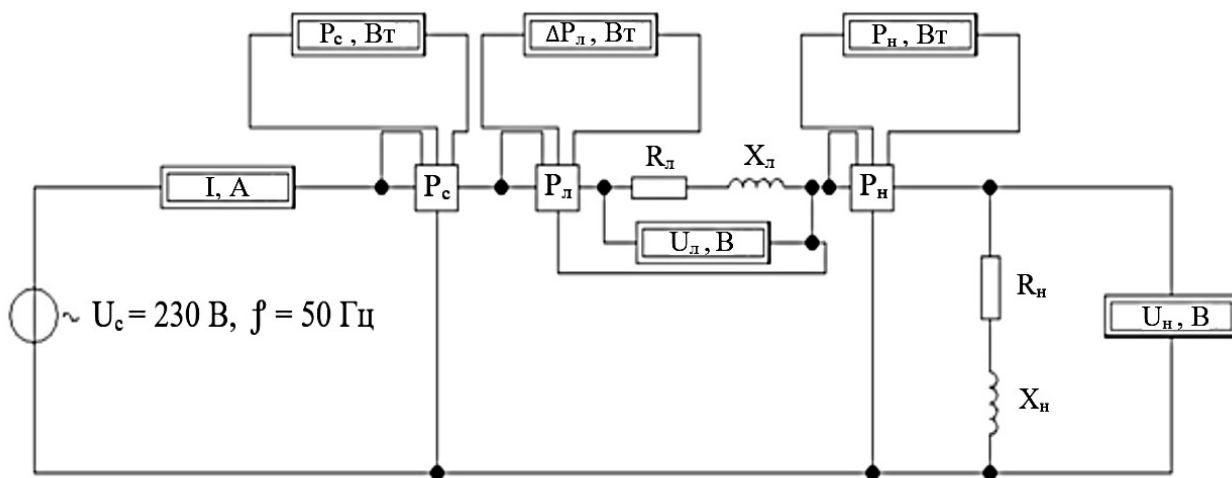


Рисунок 1 – Схема измерения параметров одной фазы трехфазной ЛЭП с глухозаземленной нейтралью в электронной программе Workbench

Устанавливая сопротивления ЛЭП:  $R_{л}$  и  $X_{л}$ , определяя и устанавливая сопротивления нагрузки:  $R_{н}$  и  $X_{н}$  в схеме измерения параметров сети (рис. 1), изменяют полное сопротивление сети  $Z_c$  и измеряют ток сети  $I$  с помощью амперметра. В зависимости от изменения тока сети  $I$ , с помощью вольтметров измеряют падение напряжения в ЛЭП  $U_{л}$  и на нагрузке  $U_{н}$ , а с помощью ваттметров – активную мощность источника сети  $P_c$ , потери мощности в ЛЭП  $\Delta P_{л}$  и потребляемую нагрузкой мощность  $P_{н}$ . В соответствии, с ГОСТ 54130-2010 рассчитывают потери напряжения в ЛЭП  $\Delta U_{л} = U_c - U_{н}$ . Согласно, ГОСТ 31607-2012 определяют КПД передачи электроэнергии по ЛЭП  $\eta_{п} = \frac{P_{н}}{P_c}$ .

Примечание: Сопротивления ЛЭП:  $R_{л}, X_{л}$  и допустимые токи  $I_{доп}$  алюминиевого провода и СИП 2, определены согласно [1,2,3] (табл. 1). Полное сопротивление линии электропередачи определено по выражению:  $Z_{л} = \sqrt{R_{л}^2 + X_{л}^2}$ , а коэффициент мощности ЛЭП – :  $\cos \varphi_{л} = \frac{R_{л}}{Z_{л}}$ . Однофазный ток короткого замыкания ЛЭП равен:  $I_{кз}^{(1)} = \frac{U_c}{Z_{л}}$ .

Таблица 1– Параметры линии электропередачи низкого напряжения

Провод, марки	Сопротивление 1 км провода, при 20 °С			$\cos \varphi_{л}$	$I_{доп}, А$	$I_{кз}^{(1)}, А$
	$R_{л}, Ом/км$	$X_{л}, Ом/км$	$Z_{л}, Ом/км$			
А	0,5784	0,325	0,663	0,872	210	346,7
СИП 2	0,641	0,0791	0,646	0,992	195	356,1

Сопротивления нагрузки равны:  $R_{н} = Z_{н} \cdot \cos \varphi_{н}$  и  $X_{н} = Z_{н} \cdot \sin \varphi_{н}$  определены через изменение полного сопротивления нагрузки:  $Z_{н} = \frac{3 \cdot U_{ном}^2}{S_{н}}$ , зависимой полной мощности нагрузки  $S_{н}$ , изменяющейся от 500 ВА до 150 кВА [4] и изменении её коэффициента мощности в диапазоне:  $0,4 \leq \cos \varphi_{н} \leq 1$  [5], при номинальном напряжении на шинах нагрузки,  $U_{ном} = 220 В$ .

Анализируя методику проведения экспериментов и полученные результаты измерений можно сделать следующие выводы, что:

- разработанная схема измерения параметров, одной фазы трёхфазной ЛЭП с нагрузкой, расположенной в конце ЛЭП (участка ЛЭП), в электронной программе Electronics Workbench, может быть использована и для определения потерь напряжения и мощности ЛЭП, выполненных различными проводами на различных режимах работы сети от холостого хода до тока короткого замыкания и при любом заданном коэффициенте мощности нагрузки;

- потери напряжения в ЛЭП, зависят от величины тока и полного сопротивления ЛЭП, а потери мощности от величины тока и активного сопротивления ЛЭП, при этом величина тока в ЛЭП определяется делением напряжения питания ЛЭП на полное сопротивление сети;

- при коэффициенте мощности нагрузки равном коэффициенту мощности ЛЭП ( $\cos \varphi_{н} = \cos \varphi_{л}$ ) потери напряжения в ЛЭП минимальны, а потери мощности – максимальны;

- потери напряжения в ЛЭП, выполненных самонесущим изолированным проводом СИП меньше, чем в ЛЭП, выполненных алюминиевым проводом марки А, потому что полное сопротивление СИП меньше. Потери мощности в ЛЭП, выполненных СИП больше, чем в ЛЭП, выполненных алюминиевым проводом марки А, т.к. у СИП больше активное сопротивление.

#### Литература

1. ГОСТ 839-2019. Межгосударственный стандарт. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия.– Взамен ГОСТ 839-80 ; введ. 2020-05-01 – М.: Стандартинформ, 2019. – 43 с.
2. ТУ 16-705.500-2006. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. Введ. 2006-07-01 – М.: ОАО ВНИИКП, 2006. – 17 с.
3. РД 153-34.0-20.527-98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: «Издательство НЦ ЭНАС», 2002. – 152 с.
4. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – М.: КНОРУС, 2016. – 648 с.
5. Наумов И.В., Лещинская Т.Б., Бондаренко С.И. Проектирование систем электроснабжения. – Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2011. – 327 с.