

---

УДК 621.316

Е.Р.ХАРИПОН, К.Б.ТОЛОНОВ, студенты гр. ЭСб-19-2 (ИРНИТУ)

Научный руководитель С.Г.ТИГУНЦЕВ, к.т.н., доцент (ИРНИТУ)

г. Иркутск

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ**

К электрическим сетям Филиала ПАО «Россети Сибирь» - «Бурятэнерго» подключены различные группы электроприемников. Некоторые из них являются источниками искажений напряжений в части несинусоидальности.

Одним из источников искажений является тяговая электрическая нагрузка железной дороги. В соответствии с современными требованиями к железным дорогам, их транспорт электрифицируется на переменном токе, при этом потребители контактной сети (электровозы) для создания тяги преобразуют переменный ток в постоянный, для чего используют выпрямительные установки, которые потребляют несинусоидальные токи. Вследствие чего возникает проблема несинусоидальных режимов.[2]

Указанная проблема может присутствовать в Бурятских электрических сетях.

Цели и задачи работы: провести расчетное исследование несимметричных несинусоидальных режимов электрической сети Бурятии и сравнить рассчитанные показатели качества с нормами ГОСТа 32144 – 2013.

Расчетные эксперименты проведены с помощью программного комплекса «Качество электрической энергии», разработанного на кафедре ЭССиС ИРНИТУ. Комплекс позволяет производить расчеты несимметричных и несимметричных несинусоидальных режимов в сложных электроэнергетических системах.

### **Расчет несимметричного несинусоидального режима**

Алгоритм программы для расчета установившегося несимметричного несинусоидального режима использует метод симметричных составляющих и построен на решении для прямой последовательности (ПП) и обратной последовательности (ОП) каждой гармоники системы уравнений узловых напряжений:

$$|Y_n| * |U_n| = |I_n|,$$

где  $Y_n$  – матрица собственных и взаимных проводимостей схемы замещения ПП или ОП сети  $n$ -ой гармоники;

$U_n$  - матрица-столбец напряжений  $n$ -ой гармоники ПП или ОП в узлах сети;

$I_n$  - матрица-столбец задающих токов  $n$ -ой гармоники.

В соответствии с разработанной методикой анализа ВГ, вначале выполняется расчет режима ПП на основной частоте для проверки достоверности модели объекта путем сопоставления реальных и расчетных мощностей генераций в системе, перетоков мощности и узловых напряжений. Кроме того, из результатов расчета режима на основной частоте для дальнейших исследований используются некоторые недостающие параметры, например, такие, как мощности в балансирующих узлах.

Далее производится расчет установившегося несимметричного режима, т.е. для ПП и ОП на основной частоте. Результатом расчета установившегося режима являются напряжения прямой и обратной последовательностей в узлах сети и мощности в балансирующих узлах. По полученным значениям узловых напряжений уточняются токи нагрузок и генераций, после чего расчет повторяется до достижения заданной точности.

После расчета режима на основной частоте автоматически формируются системы уравнений для расчета режимов на частотах  $n$ -ых гармоник. В матрицу  $Y_n$  вносятся сопротивления линий и трансформаторов пересчитанные для частоты соответствующей гармоники. Активные сопротивления увеличиваются в корень квадратный от номера гармоники. Индуктивные сопротивления и емкостные проводимости увеличиваются в  $n$  раз, индуктивные проводимости уменьшаются в  $n$  раз. [4]

Блок-схема алгоритма расчета установившегося несимметричного несинусоидального режима представлена на рис. 1, где:  $N_{\text{зад}}$  – число заданных гармоник.

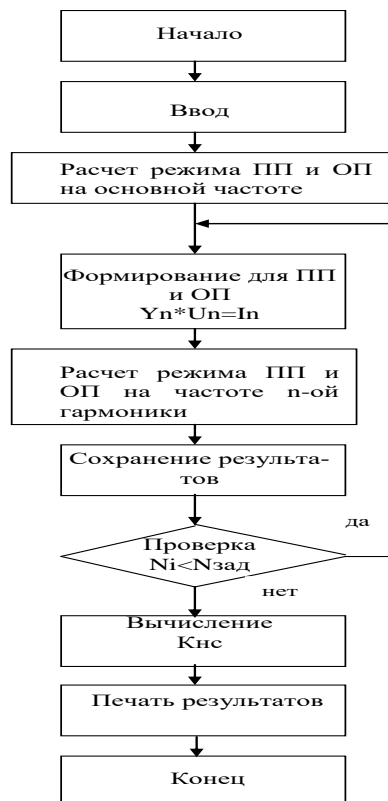


Рис.1- Блок-схема алгоритма расчета установившегося несимметричного несинусоидального режима

Для осуществления расчета по вышеизложенным алгоритмам была запрошена и получена схема сети 6 - 220 кВ Бурятэнерго. Затем по схеме сети была сформирована схема замещения сети, состоящая из 161 узла и 180 связей.

Далее был проведен предварительный расчет, который показал превышение допустимых норм качества электроэнергии по несинусоидальности напряжений только в узлах с тяговой нагрузкой. Результаты представлены в таблице на рис. 2, где указаны номера узлов с тяговой нагрузкой, номера гармонических составляющих и значения коэффициентов гармонических составляющих (в процентах) и значения суммарного коэффициента несинусоидальности. Далее сравниваем полученные значения с значениями которые требуются в ГОСТе - 32144- 2013[1]. После в «Бурятэнерго» были запрошены более подробные данные какой-либо РЭС для более подробного изучения этой проблемы

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная  
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»  
20-22 октября 2022 года**

235-4

№ узла	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	сумма
2003	1.36	0.95	1.56	0.72	0.91	0.83	0.45	0.16	0.38	0.23	0.16	0.14	0.2	0.17	0.05	0.04	0.03	0.01	0.03	2.79
2700	1.15	1.23	1.44	0.44	0.96	0.56	0.21	0.25	0.2	0.05	0.02	0.11	0.06	0.07	0.1	0.09	0.09	0.1	0.13	2.56
2007	1.35	0.92	1.5	0.69	0.85	0.76	0.4	0.16	0.33	0.19	0.12	0.27	0.3	0.17	0.18	0.13	0.11	0.1	0.1	2.7
2702	1.5	1.44	1.54	0.51	1.02	0.5	0.11	0.33	0.21	0.11	0.15	0.36	0.18	0.06	0.05	0.01	0.02	0.02	0.01	2.93
2011	1.39	0.85	1.41	0.74	0.67	0.72	0.45	0.23	0.3	0.25	0.25	0.32	0.07	0.08	0.03	0.05	0.07	0.08	0.12	2.61
2704	1.26	0.87	1.4	0.67	0.68	0.67	0.4	0.18	0.26	0.22	0.21	0.29	0.08	0.05	0.00	0.03	0.04	0.06	0.09	2.47
2015	1.46	0.75	1.1	0.71	0.39	0.39	0.34	0.43	0.13	0.13	0.16	0.35	0.18	0.11	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00	2.29
2706	1.29	0.69	1.05	0.63	0.32	0.33	0.29	0.38	0.11	0.1	0.13	0.33	0.22	0.14	0.04	0.00	0.01	0.02	0.03	2.08
2017	1.46	0.75	1.1	0.71	0.39	0.39	0.34	0.43	0.13	0.13	0.16	0.35	0.18	0.11	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00	2.29
2023	1.6	0.83	0.78	0.66	0.68	0.03	0.17	0.41	0.17	0.04	0.02	0.07	0.1	0.1	0.05	0.01	0.00	0.01	0.01	2.24
2708	1.15	0.53	0.57	0.45	0.57	0.18	0.15	0.31	0.25	0.13	0.12	0.13	0.02	0.07	0.1	0.08	0.06	0.05	0.05	1.66
2025	1.58	0.81	0.43	0.24	0.09	0.12	0.2	0.36	0.19	0.14	0.18	0.49	0.24	0.12	0.17	0.14	0.09	0.07	0.05	2.02
2709	1.22	0.54	0.22	0.08	0.05	0.08	0.19	0.29	0.27	0.22	0.25	0.55	0.2	0.1	0.14	0.1	0.05	0.03	0.02	1.59
1002	1.42	0.71	0.29	0.23	0.58	0.22	0.15	0.07	0.05	0.06	0.07	0.13	0.03	0.06	0.00	0.04	0.05	0.05	0.05	1.77
2711	0.94	0.34	0.36	0.46	0.73	0.16	0.2	0.04	0.14	0.15	0.15	0.2	0.08	0.11	0.06	0.1	0.11	0.11	0.11	1.45
2051	1.7	1.02	0.57	0.21	0.51	0.3	0.16	0.05	0.04	0.07	0.19	0.47	0.57	0.24	0.15	0.12	0.1	0.09	0.09	2.32
2716	1.14	0.62	0.56	0.46	0.68	0.16	0.08	0.18	0.15	0.18	0.3	0.56	0.54	0.18	0.08	0.06	0.04	0.03	0.04	1.88
2053	1.65	0.95	0.55	0.42	1.03	0.45	0.18	0.35	0.59	0.38	0.34	0.47	0.29	0.09	0.06	0.01	0.01	0.01	0.02	2.54
2717	1.08	0.56	0.64	0.69	1.2	0.34	0.19	0.42	0.52	0.29	0.26	0.42	0.35	0.16	0.14	0.08	0.07	0.07	0.07	2.22
2057	1.59	0.88	0.55	0.51	1.11	0.39	0.18	0.38	0.46	0.2	0.09	0.08	0.22	0.09	0.05	0.01	0.04	0.08	0.16	2.4
2719	0.75	0.1	0.94	1.09	1.52	0.3	0.4	0.61	0.35	0.08	0.14	0.22	0.18	0.08	0.11	0.15	0.17	0.21	0.28	2.45

Рис.2- Предварительные результаты расчета несинусоидального режима

Далее по схеме сети и контрольным замерам одного из РЭС была составлена схема замещения сети, которая была присоединена к основной сети 220 кВ. Итоговая схема состоит из 239 узлов и 267 связей. По общей схеме были рассчитаны параметры режимов. Результаты по характерному несимметричному несинусоидальному режиму РЭС показаны в таблице на рис. 3, где указаны номера узлов с тяговой нагрузкой, номера гармонических составляющих и значения коэффициентов гармонических составляющих (в процентах) и значения суммарного коэффициента несинусоидальности. В при сравнении значений данной таблицы с значениями требуемыми в ГОСТе 32144-2013[1]. Можно заметить, что практически все значения находятся в предельно допустимых нормах

наименование	№ узла	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	сумма
	2003	1.59	0.88	0.67	0.44	0.39	0.12	0.1	0.07	0.16	0.15	0.11	0.12	0.1	0.12	0.04	0.01	0.02	0.01	0.00	2.05
ЕЦЕК тяга 1	2700	1.43	1.03	0.56	0.41	0.27	0.06	0.08	0.06	0.17	0.1	0.05	0.06	0.06	0.11	0.06	0.02	0.02	0.03	0.04	1.94
	2007	1.56	0.86	0.64	0.41	0.36	0.11	0.09	0.06	0.16	0.12	0.08	0.11	0.03	0.09	0.1	0.07	0.05	0.04	0.03	2
Байкаль тяга	2702	1.81	1.17	0.58	0.45	0.24	0.1	0.11	0.1	0.19	0.07	0.05	0.09	0.06	0.1	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	2.31
	2011	1.6	0.83	0.65	0.41	0.37	0.15	0.12	0.1	0.09	0.1	0.09	0.08	0.09	0.1	0.06	0.03	0.00	0.02	0.03	2.02
Выдрино тяга	2704	1.45	0.83	0.6	0.38	0.34	0.12	0.1	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.1	0.08	0.05	0.01	0.01	0.02	1.87
	2015	1.66	0.77	0.62	0.37	0.3	0.18	0.13	0.12	0.18	0.06	0.03	0.09	0.03	0.09	0.07	0.04	0.01	0.00	0.00	2.02
Переем тяга	2706	1.49	0.72	0.55	0.32	0.27	0.15	0.12	0.11	0.17	0.07	0.04	0.1	0.04	0.1	0.06	0.03	0.00	0.01	0.01	1.82
	2017	1.66	0.77	0.62	0.37	0.3	0.18	0.13	0.12	0.18	0.06	0.03	0.09	0.03	0.09	0.07	0.04	0.01	0.00	0.00	2.02
	2023	1.78	0.81	0.6	0.39	0.2	0.17	0.13	0.1	0.18	0.07	0.03	0.01	0.00	0.05	0.03	0.02	0.00	0	0	2.12
Мясная тяга 2	2708	1.36	0.71	0.52	0.32	0.14	0.14	0.1	0.08	0.18	0.1	0.05	0.03	0.02	0.05	0.05	0.04	0.02	0.01	0.01	1.68
	2025	1.64	0.71	0.42	0.24	0.05	0.21	0.12	0.05	0.04	0.04	0.05	0.15	0.05	0.01	0.05	0.09	0.04	0.01	0.01	1.88
Посоль тяга 1	2709	1.37	0.6	0.32	0.17	0.1	0.2	0.1	0.03	0.03	0.03	0.05	0.14	0.04	0.03	0.04	0.08	0.04	0.00	0.00	1.57
ПС Зиграево 2	2051	1.47	0.68	0.08	0.12	0.13	0.08	0.07	0.08	0.14	0.1	0.12	0.23	0.3	0.09	0.05	0.12	0.07	0.04	0.03	1.7
Заир тяга 1	2716	0.95	0.36	0.16	0.16	0.08	0.05	0.04	0.05	0.13	0.14	0.16	0.28	0.3	0.06	0.04	0.12	0.04	0.02	0.01	1.16
	2053	1.42	0.66	0.08	0.27	0.29	0.1	0.04	0.01	0.06	0.07	0.07	0.12	0.15	0.06	0.09	0.21	0.06	0.02	0.00	1.65
Новосиль тяга 2	2717	0.95	0.34	0.27	0.33	0.22	0.05	0.02	0.05	0.07	0.04	0.04	0.09	0.18	0.11	0.14	0.23	0.03	0.00	0.01	1.18
	2057	1.37	0.63	0.12	0.28	0.28	0.09	0.03	0.01	0.03	0.02	0.02	0.07	0.14	0.06	0.06	0.13	0.05	0.03	0.04	1.58
Южа тяга 2	2719	0.63	0.24	0.43	0.37	0.17	0.07	0.06	0.07	0.07	0.04	0.07	0.12	0.11	0.01	0.03	0.14	0.1	0.06	0.07	0.94

Рис.3 - Результаты расчета несинусоидального режима РЭС

## Выводы

---

Результаты расчета режимов показали, что коэффициенты несинусоидальности не выходят за пределы допустимых норм. Соответствие результатов нормированным показателям связано с тем, что РЭС в двух местах (узлы 2031 и 2035) подключен к мощной сети 220 кВ. Проблема несинусоидальности в РЭС отсутствует.

**Список литературы:**

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 22.07.2013 – Москва: Стандартинформ, 2014 – 16 с.

2. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 3-е изд. Перераб. и доп./ И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – Москва: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с., 74 ил.

3. Горелов, Ю.И. Высшие гармоники в сетях электроснабжения / Ю.И. Горелов, В.С. Авдошин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – С. 11 – 16.

4. Волков, Н.Г. Качество электроэнергии в системах электроснабжения: учебное пособие/ Н.Г. Волков. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 152 с.

Харипон Екатерина, студент гр. ЭСб-19-2, ИРНИТУ, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.83, [haripon.ekaterina@yandex.ru](mailto:haripon.ekaterina@yandex.ru)

Толонов Кирилл, студент гр. ЭСб-19-2, ИРНИТУ, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.83, [hikatulin2001@gmail.com](mailto:hikatulin2001@gmail.com)

Тигунцев Степан Георгиевич, к.т.н., доцент, ИРНИТУ, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.83, [stiguncev@yandex.ru](mailto:stiguncev@yandex.ru)