

Утюжникова Виоллета Анатольевна,
магистрант, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: vita339100@mail.ru

Борисова Евгения Анатольевна,
магистрант, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: evenia5@mail.ru

Болоев Евгений Викторович,
к.т.н., с.н.с., Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: boloev@isem.irk.ru

БАЛАНСИРОВКА ФАЗНЫХ НАГРУЗОК В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ СЕТЯХ¹

Utyuzhnikova V.A., Borisova E.V., Boloev E.V.

BALANCING OF PHASE LOADS IN LOW VOLTAGE THREE-PHASE FOUR-WIRE NETWORKS

Аннотация. Несбалансированность фазных нагрузок является естественным негативным свойством низковольтной трехфазной четырехпроводной сети, обусловленным неравномерным подключением к фазам и различием индивидуального спроса на электроэнергию у потребителей. Дисбаланс фазных нагрузок в узлах сети приводит к снижению качества электроэнергии, завышенным техническим потерям в сети и к токовым перегрузкам в одной из фаз линий электропередачи. В работе балансирование фазных нагрузок в сети предлагается выполнять с помощью эвристического алгоритма по среднечасовым показаниям нагрузок и напряжений интеллектуальных счетчиков потребителей. Результативность алгоритма оценена по снижению потерь, максимальных токов в фазных проводах и нулевом проводе в реальном фидере электрической сети.

Ключевые слова: низковольтная распределительная сеть, несбалансированность фазных нагрузок, технические потери, интеллектуальные счетчики, эвристический алгоритм.

Abstract. The imbalance of phase loads is a natural negative property of a low-voltage three-phase four-wire network due to uneven connection to the phases and the difference in individual consumer demand for electricity. The imbalance of phase loads in the network nodes leads to a decrease in the quality of electricity, overestimated technical losses in the network and to current overloads in one of the phases of power lines. In the paper, balancing of phase loads in the network is performed using a heuristic algorithm based on average hourly readings of loads and voltages readings of consumer smart meters. The effectiveness of the algorithm was evaluated by reducing losses, maximum currents in the phase wires and the neutral wire in a real feeder of the electrical network.

Keywords: low voltage distribution networks; imbalance of phase loads; technical losses; smart meters; heuristic algorithm.

Во многих странах мира электроснабжение потребителей от распределительных подстанций осуществляется по трехфазным четырехпроводным элек-

¹ Работа выполнена в рамках проекта государственного задания фундаментальных исследований РАН «Теоретические основы, модели и методы управления развитием и функционированием интеллектуальных электроэнергетических систем», FWEU-2021-0001 (рег. №: AAAA-A21-121012190027-4).

трическим сетям на номинальных уровнях линейных/фазных напряжений 400/230 В с допустимым длительным отклонением $\pm 10\%$ [1]. В низковольтных сетях благодаря простоте систем защиты преимущественно используется схемы одностороннего питания с радиально-магистральной конфигурацией [1, 2]. Для повышения надежности электроснабжения все большее применение находят сети многостороннего питания и со слабозамкнутой кольцевой конфигурацией, а также получаемые путем объединения этих сетей в сетчатые конфигурации [1, 2]. В таких схемах выключатели в точке токораздела являются нормально-разомкнутыми, т.е. питание является односторонним. При отключении питания от основного источника включается секционный аппарат. К низковольтным сетям подключаются многочисленные одно- и трехфазные потребители мощностью от десятков ватт до нескольких сотен киловатт с индивидуальным активным, активно-индуктивным или активно-емкостным характером электропотребления. Схемы подключения однофазных потребителей: фаза – нулевой провод, bn , cn . Трехфазные потребители подключают на фазные напряжения an , bn , cn с прямым abc (bca , cab) и обратным bac (acb , cba) чередованием фаз. Из-за неравномерного подключения однофазных и трехфазных потребителей к узлам и различия спроса на электроэнергию у этих потребителей в трехфазных сетях возникает нагрузочная несимметрия, которая приводит к несимметрии напряжения, завышенным техническим потерям в сети, к токовым повышенным нагрузкам в одной из фаз в линиях электропередачи. Более подробно с причинами возникновения и последствиями дисбаланса можно ознакомиться в [3].

Наименее затратным методом снижения дисбаланса фазных нагрузок является балансировка – переключение потребителей и ответвлений-фидеров с одной фазы на другую, по возможности, с равномерной загрузкой каждой фазы по данным о фактическом электропотреблении из сети [3]. Такое перераспределение можно осуществить по среднечасовым показаниям интеллектуальных счетчиков, установленных у потребителей. В связи с этим актуальна разработка методов балансировки нагрузки между фазами в электросети, приводящим к снижению несимметрии токов и потерь электроэнергии по показаниям интеллектуальных счетчиков.

Для решения задачи балансировки нагрузки фаз в низковольтных электросетях предлагается использовать модифицированный эвристический алгоритм [4]. Балансировку предлагается выполнять не по току нагрузки потребителя I_k^L [3], а по мощности, передаваемой от узла питания фидера к потребителю $P_{1-k}^{L\text{ перед}}$, которую можно рассчитать по измеренной мощности потребителя и модулю напряжений [5]:

$$P_{1-k}^{L\text{ перед}} = P_k^L + \Delta P_{1-k}^L = P_k^L + I_k^L \Delta U_{1-k}^L = P_k^L + I_k^L (U_1^L - U_k^L) = \frac{P_k^L}{U_k^L} U_k^L + \frac{P_k^L}{U_k^L} (U_1^L - U_k^L) = \frac{P_k^L}{U_k^L} U_1^L, (1)$$

где P_k^L – измеренная нагрузка фазы L потребителя k ; U_1^L, U_k^L – измеренные модули напряжений у источника питания и у k -го потребителя фазы L относительно нейтрального провода.

Для каждого режима осуществляется выбор схемы подключения фаз L однофазных потребителей и фаз L_1, L_2, L_3 трехфазных потребителей к фазам электросети a, b, c в последовательности от узла n фидера к первому и от потребителя с наибольшей нагрузкой к потребителю с наименьшей нагрузкой в узле сети, так чтобы индекс небаланса в узлах v сети был минимальным

$$K_p = \frac{\max\left(\left|P_{1-v}^{a \text{ перед}} - P_{1-v}^{avg \text{ перед}}\right|, \left|P_{1-v}^{b \text{ перед}} - P_{1-v}^{avg \text{ перед}}\right|, \left|P_{1-v}^{c \text{ перед}} - P_{1-v}^{avg \text{ перед}}\right|\right)}{P_{1-v}^{avg \text{ перед}}},$$

где $P_{1-v}^{a \text{ перед}}, P_{1-v}^{b \text{ перед}}, P_{1-v}^{c \text{ перед}}$ – мощности, передаваемые от узла питания 1 фидера в нагрузочный узел v сети, определяемые как сумма мощностей (1) потребителей подключенных к фазам a, b, c узла v ; $P_{1-v}^{avg \text{ перед}}$ – среднее значение мощности, рассчитываемое по формуле

$$P_{1-v}^{avg \text{ перед}} = \frac{P_{1-v}^{c \text{ перед}} + P_{1-v}^{b \text{ перед}} + P_{1-v}^{a \text{ перед}}}{3}.$$

Из множества полученных оптимальных для каждого режима схем подключения потребителей к фазам электросети выбирают наиболее часто используемую схему, которая будет применена при конфигурации подключений потребителей к электросети.

Результативность эвристического алгоритма балансировки нагрузки фаз иллюстрируется на примере магистрального фидера, рисунке 1, к фазам которого подключены 24 частных дома, имеющих однофазную и трехфазную нагрузки. На рисунке 1 рядом с номерами домов указаны фазы подключения нагрузок, для определения которых было проведено специальное исследование [6]. Узел 1 фидера на рисунке 1 является питающим, узлы 2 и 6 – транзитными, в фазах a и b узел 7 также транзитный. Таким образом, фазы a и b содержат по 7, а фаза c – 8 нагрузочных узлов. На опорах 3–5 и 8, 10, 11 магистрального фидера установлено по три счетчика, на опоре 7 – два, а на опоре 9 – четыре счетчика, по одному трехфазному счетчику установлено на опорах 8, 10, 11 и два на опоре 3, остальные счетчики однофазные. Учет потребляемой электроэнергии потребителями осуществляется установленными на опорах фидера интеллектуальными трехфазными и однофазными счетчиками, а измерение суммарной поступающей в фидер электроэнергии производится балансным трехфазным счетчиком. Дополнительно к измерениям потребляемой электроэнергии, используемые интеллектуальные счетчики выполняют измерения среднечасовых значений активной и реактивной мощности и модулей напряжений.

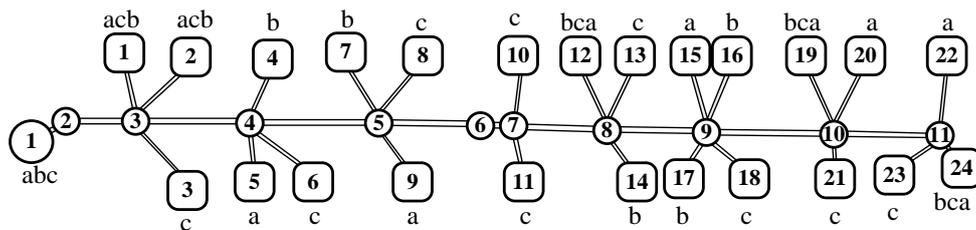


Рисунок 1 – Схема подключения потребителей к электросети до балансирования электрических нагрузок

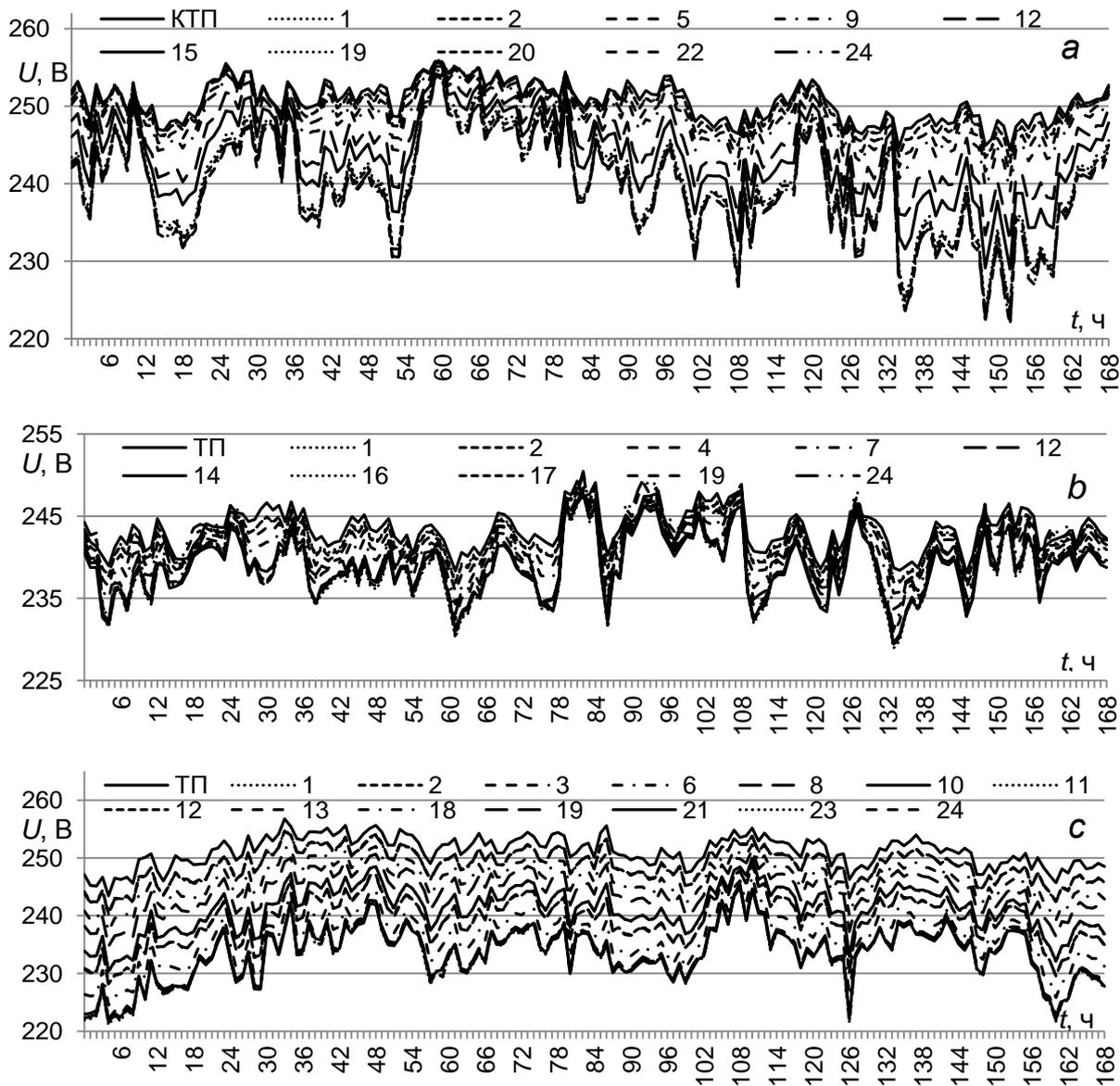


Рисунок 2 – Среднечасовые значения модулей напряжений для фаз *a*, *b*, *c* в 11-ти узлах фидера для 168 срезов измерений

По недельным 168 измерениям напряжений и нагрузок, графики которых построены соответственно на рисунке 2 и 3, после балансирования нагрузок с

помощью эвристического алгоритма выбрана новая схема подключения потребителей к фазам фидера на рисунке 4.

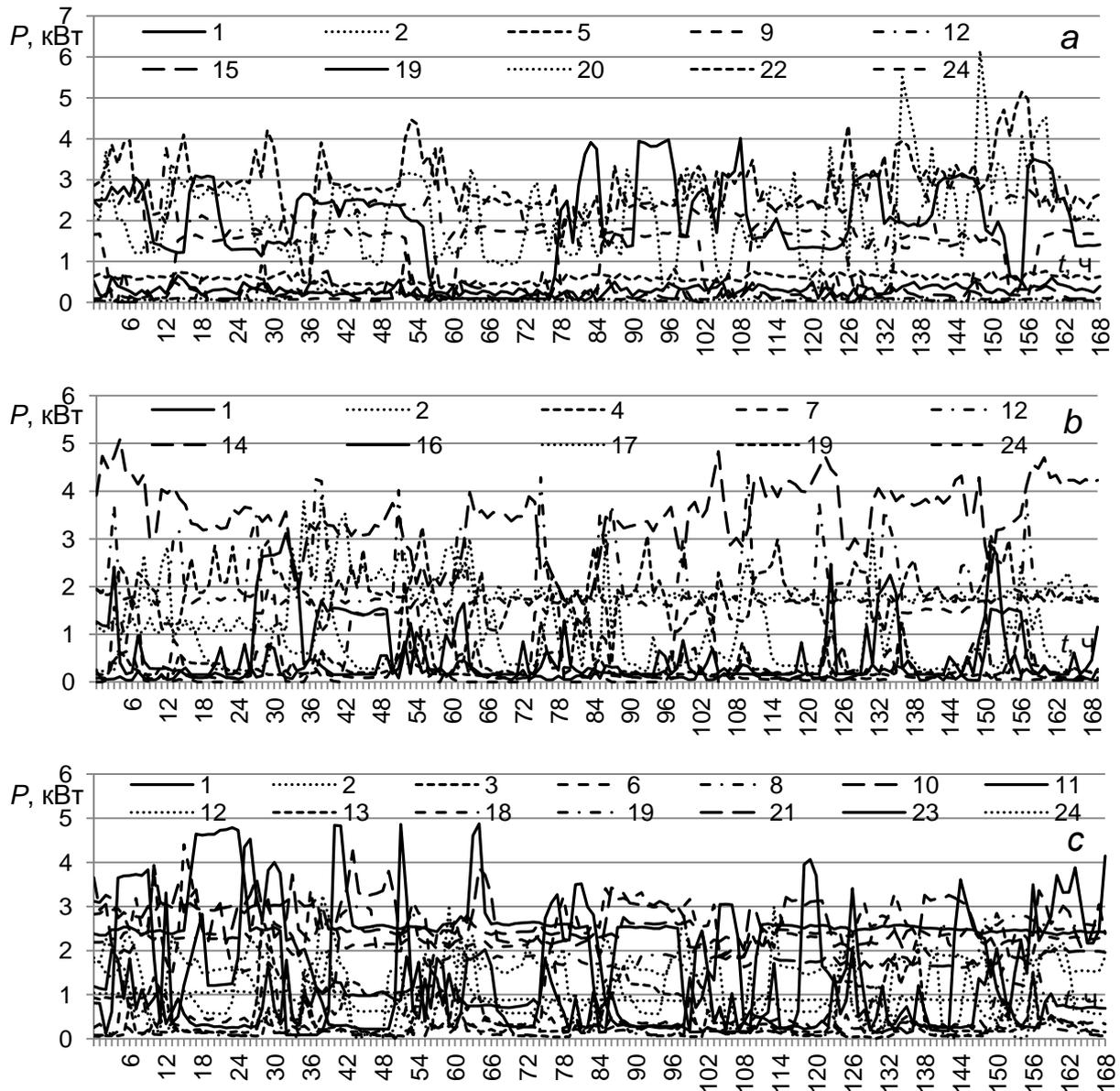


Рисунок 3 – Среднечасовые значения активных нагрузок для фаз *a*, *b*, *c* в 11-ти узлах фидера для 168 срезов измерений

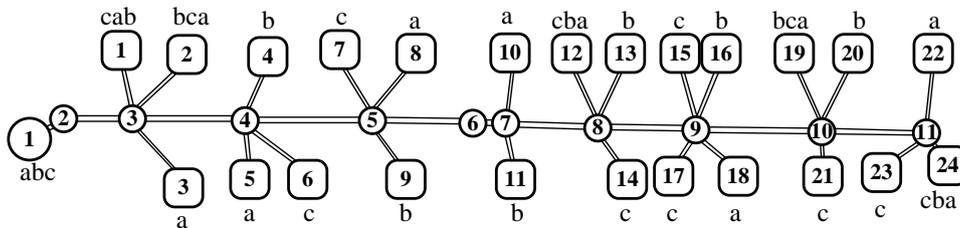


Рисунок 4 – Схема подключения потребителей к электросети после балансирования электрических нагрузок

Сравнение графиков токов на рисунках 5 и 6 в наиболее нагруженной первой секции шин в фазах до и после балансирования показывает снижение токов нагрузки в фазе *c* и незначительное увеличение токов в фазах *a* и *b*. Максимальные токи в фазах первой секции шин до и после балансирования в среднем снизились на 9,04 А, а минимальные токи практически не изменились.

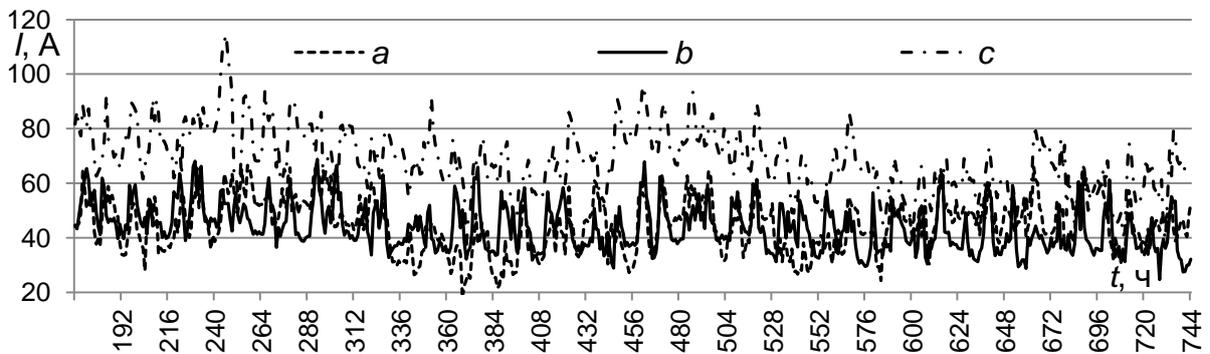


Рисунок 5 – Фазные токи в первой секции шин в срезе измерений от 169 до 744 до балансирования

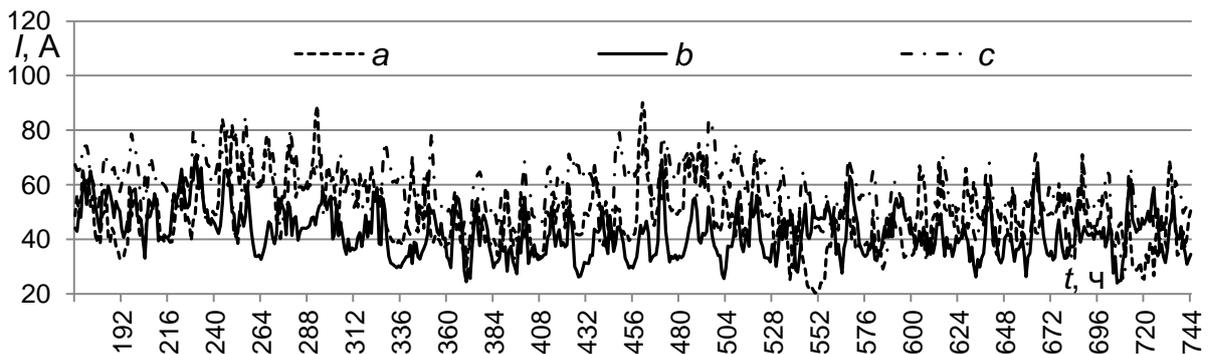


Рисунок 6 – Фазные токи в первой секции шин в срезе измерений от 169 до 744 после балансирования



Рисунок 7 – Максимальные индексы небаланса токов в срезе измерений от 169 до 744 до и после балансировки

Максимальные индексы небаланса фазных токов K_i в секциях фидера на рисунке 7, после балансирования снизились в среднем на 0,58.

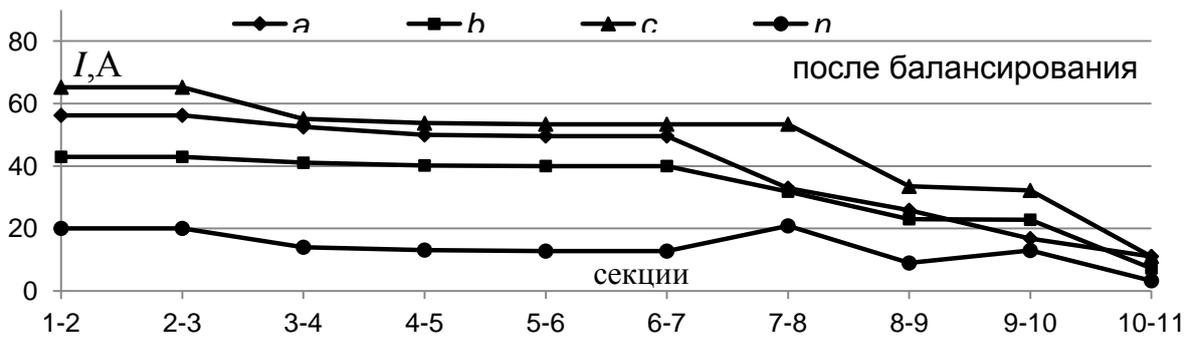
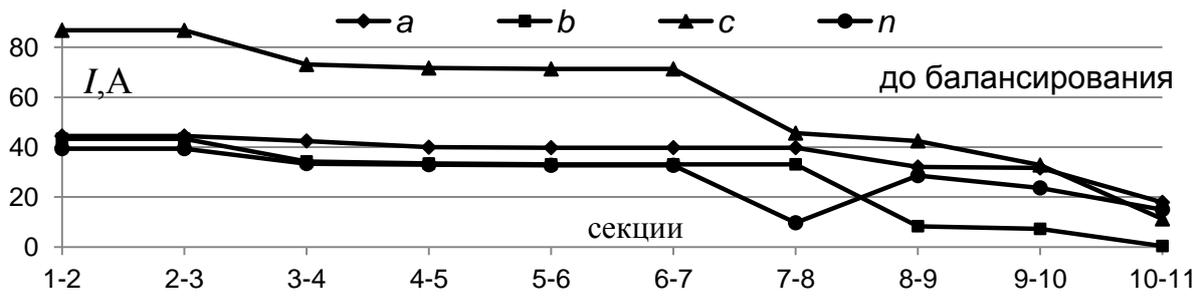


Рисунок 8 – Токи в фазах сети и нулевом проводе в 169 режиме до и после балансирования

После балансировки профили фазных токов в секциях шин оказались близкими и подобными друг к другу, а ток в нулевом проводе стал ниже фазных токов. Для сравнения на рисунке построены профили фазных токов и тока в нулевом проводе до и после балансировки в 169 режиме.

Улучшились профили напряжений вдоль фидера. Например, в 169 режиме напряжение в фазе *c*, на рисунке 7, до балансировки нагрузки снижалось с 248,53 В (в первом узле) до 227,98 В (в 11 узле), после балансировки до 232,54 В. Напряжение в фазе *b* в этом же режиме (см. рисунок 7) до балансировки с 242,28 В (в первом узле) снижалось до 238,38 В (в 8 узле) и возрастало до 240,69 В (в 11 узле), а после балансировки плавно снижается до 235,86 В.

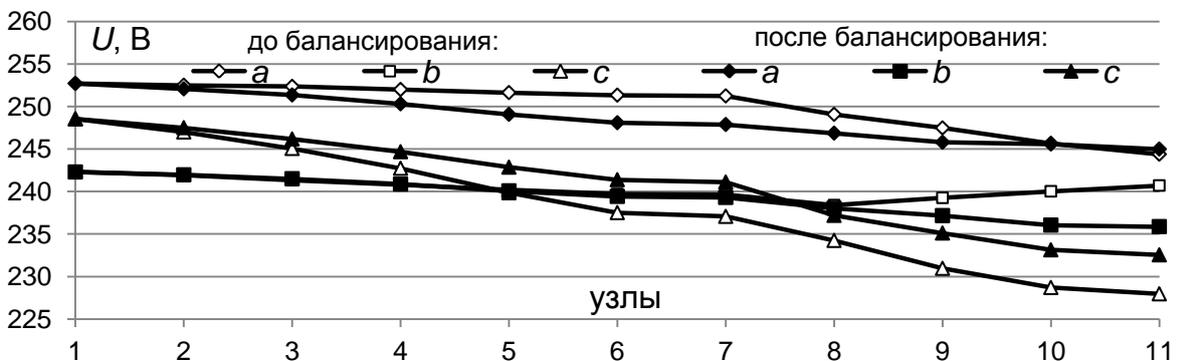


Рисунок 9 – Профили напряжения в узлах сети в 169 режиме до и после балансирования

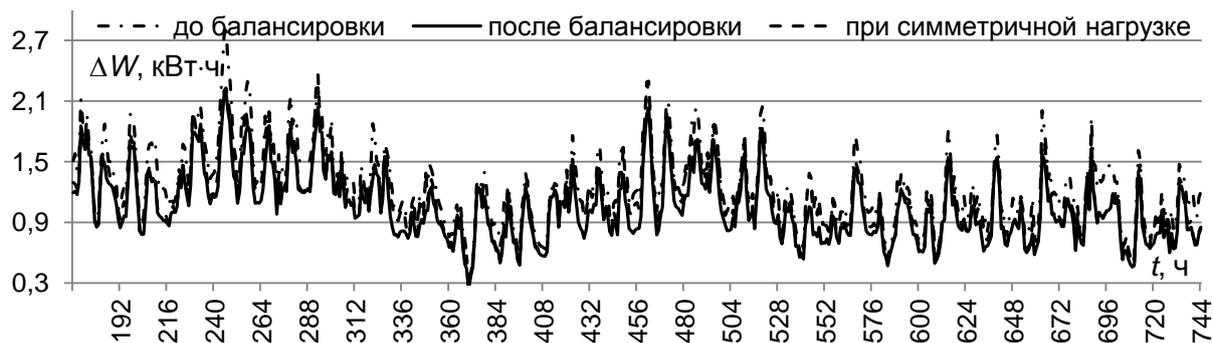


Рисунок 10 – Часовые потери электроэнергии (потери мощности) до и после балансировки нагрузки и при симметричной нагрузке

Потери электроэнергии, часовые значения которых построены на рисунке 10, в результате балансирования нагрузки снизились с 723,42 кВт·ч до 653,23 кВт·ч, т.е. на 9,7 %. Для сравнения при симметричной нагрузке потери снижаются до 607,03 кВт·ч, т.е. 16,09 %.

Дальнейшее снижения потерь обусловленных несбалансированностью фазных нагрузок возможно с помощью устройств симметрирования [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по устройству электроустановок. – Schneider Electric Publisher, 2019. – 596 с.
2. **Lakervi, E.** Electricity distribution network design / E. Lakervi, E.J. Holmes // IET Power and energy. Series 21. – London: Published by The Institution of Engineering and Technology, 2003. – 340 p.
3. **Ma, K.** Review of distribution network phase unbalance: Scale, causes, consequences, solutions, and future research directions / K. Ma, L. Fang, W. Kong // CSEE Journal of Power and Energy Systems. – 2020. – Vol. 6. № 3. – P. 479–488.
4. **Lin, C.H.** Heuristic rule-based phase balancing of distribution systems by considering customer load patterns / C.H. Lin [et al.] // IEEE Transactions on Power Systems. – 2005. – Vol. 20. №. 2. – P. 709–716.
5. **Голуб, И.И.** Метод расчета потокораспределения вторичной распределительной сети по измерениям интеллектуальных счетчиков / И.И. Голуб, Е.В. Болоев, Я.И. Кузькина // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 71. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации. В 3-х книгах. Книга 2. отв. ред. Н.И. Воропай. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2020. – С. 123–133.
6. **Кузькина, Я.И.** Идентификация фаз подключения интеллектуальных счетчиков в низковольтной распределительной сети / Я.И. Кузькина, И.И. Голуб // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. № 1. – С. 135–144.