

УДК 621.311

ВЛИЯНИЕ НЕСИММЕТРИИ НАГРУЗКИ ПО ФАЗАМ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

Денисевич Т.А.

Научный руководитель – старший преподаватель Мышковец Е.В.

Симметричная трехфазная система напряжений характеризуется схожими по модулю и фазе напряжениями во всех 3-х фазах. При несимметричных режимах напряжения в различных фазах не равны.

Несимметричные режимы в электрических сетях появляются по последующим причинам:

- 1) неодинаковые нагрузки в разных фазах,
- 2) неполнофазная работа линий либо других частей в сети,
- 3) разные характеристики линий в различных фазах.

Часто несимметрия напряжений появляется из-за неравенства нагрузок фаз. В городских и сельских сетях 0,38 кВ несимметрия напряжений вызывается в основном подключением однофазных осветительных и бытовых электроприемников малой мощности. Количество таких однофазных электроприемников велико, и их необходимо умеренно распределять по фазам для уменьшения несимметрии.

Для проведения расчета примем следующие исходные данные.

Внутри здания сети внутреннего электроснабжения выполнены по схеме "звезда" с нейтральным проводом. Отдельные помещения подключены к разным фазам трехфазного источника электроэнергии с линейным напряжением $U_{л} = 380$ В и частотой тока $f = 50$ Гц, в качестве которого используется распределительный щит или электрический шкаф; нагрузки фаз: в фазе А – лампы накаливания, электродвигатель, калорифер, в фазе В – лампы накаливания, электродвигатель, трансформатор, в фазе С - калорифер. Считаем лампу накаливания активной нагрузкой, калорифер, электродвигатель и трансформатор активно-индуктивной нагрузкой. Электрическая схема замещения рассчитываемой трехфазной цепи представлена на рис. 1.

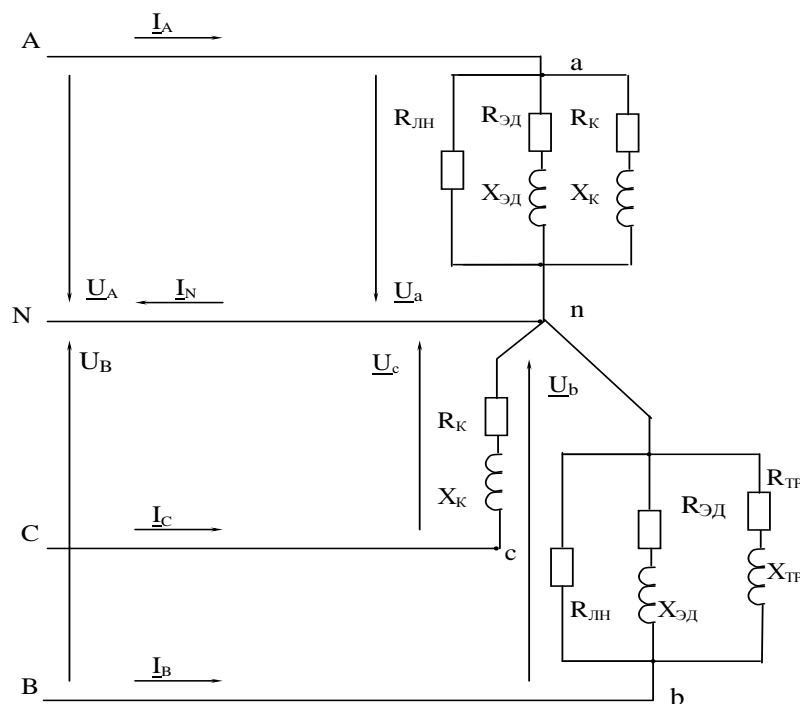


Рисунок 1. Электрическая схема замещения трехфазной цепи

Исходные данные приведены в таблице 1 и таблице 2.

Таблица 1 - Параметры нагрузки

Лампы накаливания	Калориферы		Трансформаторы		Электродвигатели		
	$P_{\text{ЛН}}, \text{Вт}$	$P_{\text{к}}, \text{Вт}$	$\cos \varphi_{\text{к}}$	$S_{\text{ТР}}, \text{ВА}$	$\cos \varphi_{\text{ТР}}$	$P_{\text{ЭД}}, \text{Вт}$	КПД
200	1100	0,995	1500	0,65	1000	0,75	0,8

Таблица 2 - Параметры линии передачи

$L, \text{м}$	$\rho, \text{Ом*мм}^2/\text{м}$	$A, \text{мм}^2$
185	0,03	3

Находим значение активного и реактивного сопротивлений по следующим формулам:

а) для лампы накаливания

$$R = \frac{U_{\phi}^2}{P}, \tag{1}$$

где R - активное сопротивление, Ом;

U_{ϕ} - фазное напряжение, В;

$P_{\text{ЛН}}$ - активная мощность, Вт;

б) для калорифера, трансформатора, электродвигателя:

$$Z = \frac{U_{\phi}^2}{S}, \tag{2}$$

где $Z_{\text{к}}$ - полное сопротивление, Ом;

$S_{\text{к}}$ - полная мощность, Вт;

$$R = Z * \cos \varphi, \tag{3}$$

$$X = Z * \sin \varphi; \tag{4}$$

где X - реактивное сопротивление, Ом;

Так как анализируется схема соединения звездой с нейтральным проводом, то благодаря последнему фазные напряжения равны

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \tag{5}$$

Для рассматриваемого примера вычисляем по формулам (1) - (5) и сводим в таблицу 3:

Таблица 3 - Значения сопротивлений

	Полное сопротивление	Активное сопротивление	Реактивное сопротивление
Лампа накаливания		242,00	
Калорифер	43,78	43,56	4,37
Трансформатор	32,27	20,97	24,54
Электродвигатель	29,04	23,23	17,42

Ток, протекающий через каждый потребитель, рассчитываем по закону Ома. При этом чтобы получить и действующее значение, и начальную фазу токов, расчет ведём в комплексной форме.

Для фазы А:

$$\underline{I}_{\text{ЛН}}^a = \underline{U}_A / R_{\text{ЛН}} = 220e^{j0} / 242 = 0,909 A;$$

$$\underline{I}_{\text{ЭД}}^a = \underline{U}_A / Z_{\text{ЭД}} = 220e^{j0} / [29,04e^{j \arccos 0,8}] = 7,576e^{-j36,87} A,$$

$$\underline{I}_{\text{К}}^a = \underline{U}_A / Z_{\text{К}} = 220e^{j0} / [43,78e^{j \arccos 0,995}] = 5,025e^{-j5,735} A;$$

Для фазы В, С ток, протекающий через каждый потребитель, рассчитываем аналогично

$$\underline{I}_{ЛН}^b = 0,909e^{-j120} A, \quad \underline{I}_{ЭД}^b = 7,576e^{-j156,87} A, \quad \underline{I}_{ТР}^b = 6,817e^{-j169,46} A;$$

$$\underline{I}_K^c = 5,025e^{-j245,73} A.$$

Рассчитаем активную, реактивную и полную мощности каждой фазы:

Для фазы А:

$$P_a = P_{ЛН} + P_K + (P_{ЭД} / \eta) = 200 + 1100 + (1000 / 0,75) = 2633 \text{ Вт},$$

$$Q_a = I_K^2 X_K + I_{ЭД}^2 X_{ЭД} = 5,025^2 * 4,37 + 7,576^2 * 17,42 = 1110 \text{ Вар},$$

$$S_a = \sqrt{P_a^2 + Q_a^2} = \sqrt{2633^2 + 1110^2} = 2857 \text{ ВА};$$

Для фазы В, С рассчитываем мощности аналогично

$$P_b = 2508 \text{ Вт}; \quad Q_b = 2139 \text{ Вар}; \quad S_b = 3296 \text{ ВА};$$

$$P_c = P_K = 1100 \text{ Вт}; \quad Q_c = 110 \text{ Вар}; \quad S_c = 1106 \text{ ВА}.$$

Коэффициент мощности для каждой фазы равен:

$$\cos \varphi_a = P_a / S_a = 2633 / 2857 = 0,922,$$

$$\cos \varphi_b = P_b / S_b = 2508 / 3296 = 0,761,$$

$$\cos \varphi_c = \cos \varphi_K = 0,995.$$

Линейные токи и ток в нейтральном проводе удобнее всего рассчитывать в комплексной форме по первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ЛН}^a + \underline{I}_{ЭД}^a + \underline{I}_K^a = 0,909 + 7,576e^{-j36,87} + 5,025e^{-j5,73} = 12,99e^{-j22,86} A,$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{ЛН}^b + \underline{I}_{ЭД}^b + \underline{I}_{ТР}^b = 0,909e^{-j120} + 7,576e^{-j156,87} + 6,817e^{-j169,46} = 14,99e^{-j199,53} A,$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_K^c = 5,025e^{-j245,73},$$

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 11,97 - 5,047j - 14,124 - 5,01j - 2,065 + 4,58j = 6,91e^{j232,39} A.$$

Полное сопротивление каждой фазы находим используя метод проводимостей или эквивалентных преобразований:

$$\underline{Z}_a = \underline{U}_A / \underline{I}_A = 16,96e^{j23,02} \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_b = \underline{U}_B / \underline{I}_B = 14,7e^{j40,54} \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_c = \underline{U}_C / \underline{I}_C = 43,78e^{j5,73} \text{ Ом}.$$

Используя для мощности трехфазной цепи, находим:

$$P_H = P_a + P_b + P_c = 2633 + 2508 + 1100 = 6241 \text{ Вт},$$

$$Q_H = Q_a + Q_b + Q_c = 1110 + 2139 + 110 = 3359 \text{ Вар},$$

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + Q_H^2} = \sqrt{6241^2 + 3359^2} = 7088 \text{ ВА},$$

$$\cos \varphi_H = P_H / S_H = 6241 / 7088 = 0,8805.$$

Баланс мощностей для цепи переменного тока, в том числе и трехфазной цепи, заключается в вычислении отдельно суммы активных мощностей и суммы реактивных мощностей, потребляемых всеми электроприемниками, и сравнении значений этих сумм с действительной и мнимой частями комплекса полной мощности, отдаваемой источником (источниками) электроэнергии:

$$\underline{S} = \underline{U}_A \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \underline{I}_C^* = P + jQ, \quad (6)$$

где $\underline{I}_A^*, \underline{I}_B^*, \underline{I}_C^*$ - сопряженные комплексы линейных токов.

$$\underline{S} = 220 \exp(j0^0) 12,99e^{j22,86} + 220e^{-j120} * 14,99 * e^{-j199,53} + 220e^{-j240} * 5,025e^{j245,73} = 6242,1 + j3361,$$

т.е. $P = 6242,1 \text{ Вт}$, $Q = 3361 \text{ Вар}$.

Почти такие же результаты получены выше, где $P_H = 6241 \text{ Вт}$, $Q_H = 3359 \text{ Вар}$. Так как эти данные найдены именно как суммы мощностей отдельных потребителей, считаем, что баланс мощностей сошелся с погрешностью менее 1%, что означает правильность выполненных ранее расчетов.

Векторная диаграмма представлена на рис. 2.

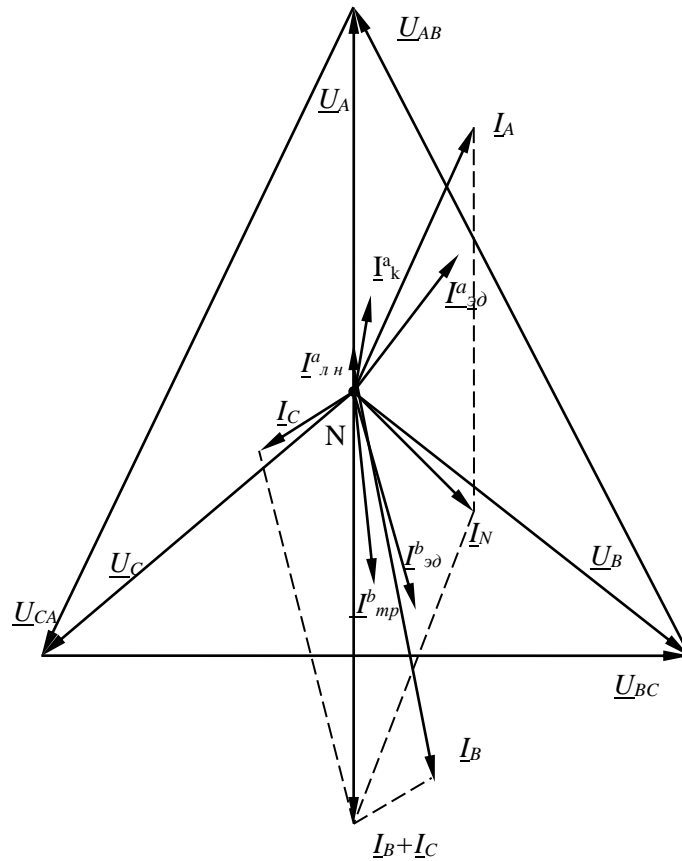


Рисунок 2 Векторная диаграмма цепи с нейтральным проводом

Наименьший коэффициент мощности в фазе b: $\cos \varphi_B = 0,761$, который повысим до значения $\cos \varphi_B = 0,995$. С этой целью параллельно нагрузкам фазы b включаем конденсатор, емкость которого определим из формулы:

$$tg \varphi_1 = (B_{эд} + B_{тр} - B_C) / (G_{лн} + G_{эд} + G_{тр}), \tag{7}$$

где $tg \varphi_1$ определяем по заданному $\cos \varphi_1$;

$$B_C = 2\pi f C = 100\pi C, \tag{8}$$

Для рассматриваемого примера имеем:

$$G_{лн} = 1 / R_{лн} = 1 / 242 = 0,0041 \text{ См},$$

$$G_{эд} = R_{эд} / (R_{эд}^2 + X_{эд}^2) = R_{эд} / Z_{эд}^2 = 23,23 / 29,04^2 = 0,0275 \text{ См},$$

$$G_{тр} = R_{тр} / (R_{тр}^2 + X_{тр}^2) = R_{тр} / Z_{тр}^2 = 0,0201 \text{ См},$$

$$G_{лн} + G_{эд} + G_{тр} = 0,0517 \text{ См},$$

$$B_{эд} + B_{тр} = X_{эд} / Z_{эд}^2 + X_{тр} / Z_{тр}^2 = 0,0442 \text{ См}.$$

$$B_C = 0,0442 - 0,1004 * 0,0517 = 0,039 \text{ См},$$

$$C = 0,039 / 100 = 124 * 10^{-6} \text{ Ф} = 124 \text{ мкФ}.$$

$$Q_C = U_B^2 * B_C = 220^2 * 0,039 = 1888 \text{ Вар}.$$

При наличии конденсатора линейный ток фазы b найдём по формуле:

$$I_B = U_B \sqrt{(G_{лн} + G_{эд} + G_{тр})^2 + (B_{эд} + B_{тр} - B_C)^2}, \tag{9}$$

$I_B = 220 \sqrt{0,0517^2 + 0,005^2} = 11,43 \text{ А}$, что меньше действующего значения линейного тока при отсутствии конденсатора.

В нашем случае наиболее мощным электроприемником является электродвигатель,

который потребляет наибольший ток $I_{\text{ЭД}} = 7,576 \text{ А}$. Так как в схеме рис. 1 два электродвигателя, будем считать, что удалён от источника электроэнергии электродвигатель фазы а (рис. 3).

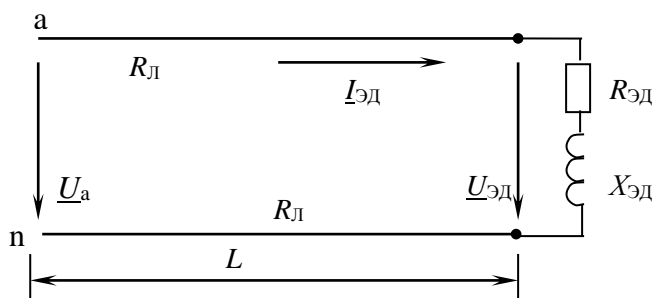


Рисунок. 3 Схема включения электродвигателя через двухпроводную линию передачи

Сопротивление каждого провода двухпроводной линии передачи равно:

$$R_{\text{Л}} = \rho l / A = 0,03 * 185 / 3 = 1,85 \text{ Ом}.$$

Тогда фактическое напряжение на электродвигателе равно:

$$\underline{U}_{\text{ЭД}} = \underline{U}_a - \underline{I}_{\text{ЭД}} 2R_{\text{Л}}, \quad (10)$$

$$\underline{I}_{\text{ЭД}} = \underline{U}_{\text{ЭД}} / (2R_{\text{Л}} + \underline{Z}_{\text{ЭД}}) = 220 / (3,7 + 23,23 + j17,42) = (5,76 - j3,73) \text{ А},$$

$$\underline{U}_{\text{ЭД}} = 220(5,76 - j3,73) / 3,7 = 198,69 + j13,8 = 199,17 e^{j3,97},$$

т.е. $U_{\text{ЭД}} = 199,17 \text{ В}$, что более чем на 5% отличается от номинального фазного напряжения $U_{\phi} = 220 \text{ В}$.

Так как нагрузка является несимметричной, то при разорванном нейтральном проводе возникает напряжение смещения нейтрали, которое определяется по формуле:

$$\underline{U}_{Nn} = \frac{\frac{U_A}{Z_a} + \frac{U_B}{Z_b} + \frac{U_C}{Z_c}}{\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c}}, \quad (11)$$

$$\underline{U}_{Nn} = \frac{\frac{220}{[16,96 \exp(j23,02^{\circ})]} + \frac{[220 \exp(-j120^{\circ})]}{[14,78 \exp(j40,54^{\circ})]} + \frac{[220 \exp(-j240^{\circ})]}{[43,78 \exp(j5,73^{\circ})]}}{\frac{1}{[16,96 \exp(j23,02^{\circ})]} + \frac{1}{[14,7 \exp(j40,54^{\circ})]} + \frac{1}{[43,78 \exp(j5,73^{\circ})]}} =$$

$$= -7,73 - 46,61j = 47,24 \exp(-j99,4^{\circ}).$$

Фазные напряжения на нагрузке равны:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{Nn} = 220 + 7,73 + j46,61 = 227,73 + j46,61 = 232,45 e^{j11,6} \text{ В},$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{Nn} = 220 e^{-j120} + 7,73 + j46,61 = -102,27 - j143,92 = 176,55 e^{-j125,4} \text{ В},$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{Nn} = 220 e^{-j240} + 7,73 + j46,61 = -102,27 + j237,14 = 258,25 e^{j113,33} \text{ В}.$$

Линейные токи, как и ранее, определим в комплексной форме по закону Ома:

$$\underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{Z}_a = 232,45 e^{j11,6} / 16,96 e^{j23,02} = 13,7 e^{-j11,4},$$

$$\underline{I}_b = \underline{U}_b / \underline{Z}_b = 176,55 e^{-j125,4} / 14,7 e^{j40,54} = 12 e^{-j165,9},$$

$$\underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{Z}_c = 258,25 e^{j113,33} / 43,78 e^{j15,73} = 5,9 e^{j107,6}.$$

Совмещенная диаграмма напряжений и линейных токов при отсутствии нейтрального провода представлена на рис. 4.

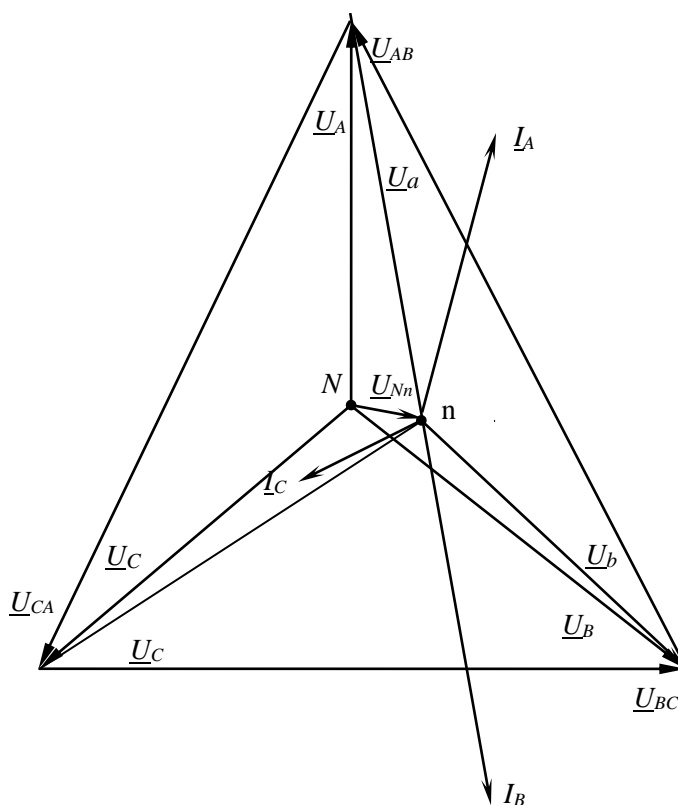


Рисунок 4. Векторная диаграмма цепи без нейтрального провода

При анализе полученных результатов следует учесть, что хотя в трехфазной сети с целью обеспечения неизменности фазных напряжений на нагрузке и равенства их между собой присутствует нейтральный провод, при значительно несимметричной нагрузке могут быть нежелательные явления:

1) Большое возрастание тока в одном из линейных проводов ведет к ощутимому падению напряжения на сопротивлении этого провода, если он достаточно длинный и имеет малую площадь сечения. В результате фазное напряжение на нагрузке может заметно снизиться, что часто недопустимо для работы электропотребителей.

2) Из-за значительного неравенства нагрузок отдельных фаз резко возрастает ток в нейтральном проводе, что может быть причиной его перегрева вплоть до возникновения аварийной ситуации. Кроме того, возросшее падение напряжения на сопротивлении нейтрального провода ведет к появлению напряжения смещения нейтрали, а значит к неравенству фазных напряжений на нагрузке, что особенно проявляется при обрыве нейтрального провода. В рассмотренном примере в последнем случае получены следующие фазные напряжения: $U_a = 232B > U_\phi$, $U_b = 177B < U_\phi$, $U_c = 258B > U_\phi$. Следовательно, перенапряжение в фазах а и с ведет к быстрому выходу из строя потребителей, а значительное снижение напряжения в фазе б может привести к остановке оборудования. Поэтому необходимо постоянно следить за уровнем несимметрии нагрузки путем замера фазных сопротивлений (или линейных токов) и вычисления напряжения смещения нейтрали или замера фазных напряжений.

Литература

1. Электротехника и электрооборудование/ П.П.Ястребов, И.П.Смирнов, Г.Д.Журавлев и др.; Под ред.П.П. Ястребова. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1987.
2. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника. М.: Энергоатомиздат. 1985.
3. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В. Г. Герасимова, М.: Высшая школа, 1987.