

EDN: FEHWNS

УДК 621.311

## A Device for Controlling Anbalancing Modes in Components of Low-Voltage Power Supply Systems

Igor V. Naumov<sup>a, b</sup>,

Elvira S. Fedorinova<sup>b</sup> and M. A. Yakupova<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Irkutsk National Research Technical University*

*Irkutsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Yezhevsky*

*Irkutsk, Russian Federation*

Received 16.01.2023, received in revised form 03.02.2023, accepted 12.03.2023

**Abstract.** The article discusses the influence of unbalanced power consumption on the level of asymmetry of currents and voltages in low-voltage power supply systems and their components. It is proved that the resulting asymmetry of the three-phase power supply voltage system has a negative impact on the indicators characterizing the quality of electrical energy, and the asymmetry of currents in these systems entails an increase in power and energy losses, which is accompanied by increased power consumption, increased heat load, which is the cause of fires, as well as a decrease in the level of reliability of power supply. As the most effective means of minimizing the consequences of asymmetric modes, a new technical means is proposed with an automatic change in its power due to self-regulating inductance, depending on the level of unbalanced power consumption. Based on the calculations performed, the parameters were determined and a physical model of the proposed device was made, the effectiveness of which was proved by experimental studies performed in laboratory conditions. The symmetry efficiency reaches 60 %.

**Keywords:** power supply system, balancing device, power quality, additional power losses, reliability of power supply.

Citation: Naumov, I.V., Fedorinova, E.S., Yakupova, M.A. A device for controlling anbalancing modes in components of low-voltage power supply systems. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(2), 175–186. EDN: FEHWNS



## Устройство для управления несимметричными режимами в компонентах низковольтных систем электроснабжения

И. В. Наумов<sup>а, б</sup>, Э. С. Федоринова<sup>б</sup>, М. А. Якупова<sup>б</sup>

*<sup>а</sup>Иркутский национальный  
исследовательский технический университет  
Российская Федерация, Иркутск*

*<sup>б</sup>Иркутский государственный  
аграрный университет имени А. А. Ежовского  
Российская Федерация, Иркутск*

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы влияния несбалансированного электропотребления на уровень несимметрии токов и напряжений в низковольтных системах электроснабжения и их компонентах. Доказано, что возникающая несимметрия трехфазной системы напряжения электропитания оказывает негативное влияние на показатели, характеризующие качество электрической энергии, а несимметрия токов в этих системах влечет за собой увеличение потерь мощности и энергии, что сопровождается увеличенным электропотреблением, повышением тепловой нагрузки, являющимся причиной возникновения пожаров, а также снижением уровня надежности электроснабжения. В качестве наиболее эффективного средства минимизации последствий несимметричных режимов предлагается новое техническое средство с автоматическим изменением его мощности за счет саморегулируемой индуктивности в зависимости от уровня несбалансированного электропотребления. На основании произведенных расчетов определены параметры и изготовлена физическая модель предлагаемого устройства, эффективность которой доказана путем экспериментальных исследований, произведенных в лабораторных условиях. Эффективность симметрирования достигает 60 %.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, симметрирующее устройство, качество электроэнергетики, дополнительные потери мощности, надежность электроснабжения.

Цитирование: Наумов И. В. Устройство для управления несимметричными режимами в компонентах низковольтных систем электроснабжения / И. В. Наумов, Э. С. Федоринова, М. А. Якупова. Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(2). С. 175–186. EDN: FENHWS

**Введение.** Электрические сети напряжением 0,4 кВ формируют основные компоненты низковольтных систем электроснабжения (КНСЭС), которые представлены полнофазными (в трёхфазном исполнении), а также неполнофазными (в двух- и однофазном исполнении) ответвлениями, по которым электропередача потребителям производится воздушными и кабельными линиями. Отличительной особенностью таких КНСЭС является их многоамперность, и в силу этого даже незначительные изменения токовой нагрузки могут приводить к достаточно существенным изменениям напряжения электропитания, как на шинах 0,4 кВ источника питания, так и во всей трехфазной системе. Многочисленными исследованиями, проведенными в таких системах, установлено, что режимы работы действующих КНСЭС объективно несимметричны, что приводит к изменению норм качества электрической энергии и соответствующему возрастанию дополнительных потерь мощности, обусловленных несбалансированным электропотреблением как в системах, питающих производство, так и в системах, которые обеспечивают жизнедеятельность населения [1–12].

Одним из критериев оценки электромагнитной совместимости технических средств в единой электромагнитной среде КНСЭС по нулевой последовательности является коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, который, в соответствии с [13], определяется как:

$$K_{0u} = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $U_0$  и  $U_1$  – соответственно симметричные составляющие нулевой и прямой последовательностей основной частоты напряжения электропитания, определяемые по показаниям соответствующего измерительного прибора либо рассчитанные по методу [14].

Дополнительные потери активной мощности, обусловленные несимметричным электропотреблением, оцениваются коэффициентом увеличения потерь мощности, определяемым в соответствии с выражением:

$$K_P = 1 + K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \cdot K_R, \quad (2)$$

где  $K_R = r_0/r_1$  – коэффициент активного сопротивления ЛЭП;  $r_1 = r_\phi$  – активное сопротивление прямой последовательности, равное фазному сопротивлению линии электропередачи;  $r_0 = r_\phi + 3r_N$  – активное сопротивление нулевой последовательности ЛЭП;  $r_N$  – активное сопротивление нейтрального проводника. При одинаковых сечениях фазного и нулевого проводников их активные сопротивления будут равны. Соответственно, и коэффициент  $K_R$  в этом случае будет равен 4.  $K_{2i}$ ,  $K_{0i}$  – коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям, определяемые либо по показаниям измерительного прибора, либо в соответствии с [14].

Коэффициенты, определяемые по выражениям (1) и (2), могут достигать значительных величин. Это неоднократно подтверждалось в опубликованных материалах исследований, произведенных в КНСЭС различной хозяйственной принадлежности [15, 16]. При этом коэффициент потерь  $K_P$  характеризует не только увеличенное электропотребление, что сопровождается дополнительным расходом и соответствующим увеличением стоимости расчетов за потребленную электрическую энергию, но и в значительной степени увеличивает возможность возникновения пожаров на объектах социальной и производственной сферы электропотребления [11, 17, 18].

Кроме указанных последствий несимметрия токов, обуславливающая увеличение потерь мощности, оказывает существенное влияние и на уровень надежности электроснабжения. Одной из наиболее значимых причин возникновения отказов в системах электроснабжения за указанный промежуток времени является именно несбалансированность токовой нагрузки в трёхфазной системе. В результате возникающих перегрузок в разных фазах происходит перегрев плавких вставок предохранителей, срабатывание автоматических выключателей и даже обрыв ЛЭП. В качестве примера можно рассмотреть данные по отказам в результате аварийных ситуаций в КНСЭС ПАО «Тываэнерго» за 4-й квартал 2022 г. [19]. Анализ этих данных показал, что за октябрь, ноябрь и декабрь из общего количества отказов (128) на долю несбалансированности электропотребления приходится 16,4 % всех аварийных отключений. Процентное соотношение других причин отказов к их общему количеству выглядит следующим образом: схлест проводов – 36,72 %; обрыв проводов – 10,16 %; повреждение кабеля – 5,47 %; повреждение изоляторов и коммутационной аппаратуры – 9,38 %; наезд автотранспорта и проникновение животных и птиц – 10,16 %; повреждения в ведомственных сетях – 11,72 %. Как видно, коли-

чество возникающих отказов по причине несимметрии фазных токов, являющейся следствием несбалансированного электропотребления, находится на 2 месте после причин, обусловленных износом основных элементов систем электроснабжения.

Отмеченное выше позволяет утверждать, что разработка способов и технических средств минимизации последствий несимметричных режимов в КНСЭС является актуальной задачей в решении вопросов повышения эффективности использования электрической энергии в системах, обеспечивающих электропотребление для различных нужд.

**Результаты исследования.** Проведенный анализ существующих технических средств [20–22] для минимизации последствий несимметричного электропотребления позволил определить наиболее эффективные из них, использование которых может служить основой для разработки нового технического решения. Результатом такого анализа является предлагаемое нами симметрирующее устройство (СУ) с автоматически изменяющейся индуктивностью (рис. 1).

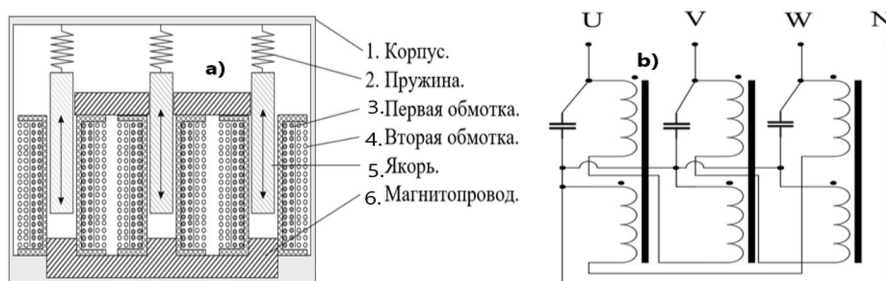


Рис. 1. Симметрирующее устройство для трёхфазных низковольтных систем электроснабжения: а) конструкция, б) электрическая схема

Fig. 1. Balancing device for three-phase low-voltage power supply systems: a) design, b) electrical diagram

Параметры СУ рассчитываются в соответствии с изменяющимся уровнем электропотребления. Для осуществления исследований, подтверждающих эффективность применения СУ, в лабораторных условиях была создана экспериментальная установка, позволяющая создавать имитационные режимы несбалансированного электропотребления в модели КНСЭС за счет подключения различной по мощности однофазной электрической нагрузки (рис. 2)

Исходя из максимального уровня электропотребления, который можно получить на представленной модели, был произведен расчет конструктивных параметров физической модели СУ. Электромагнитный аппарат рассчитывается по принципу трехфазного двухобмоточного силового трансформатора с  $K_{tr}=1$ . Основными, непосредственно задаваемыми величинами для расчета физической модели трансформатора являются число фаз, номинальные мощности, номинальные напряжения и  $\cos \varphi$ .

Основными элементами конструкции трансформатора являются магнитопровод и катушки с обмотками.

Исходными данными для расчета являются данные технического задания, которое включает в себя следующую информацию: количество числа фаз  $m=3$ , номинальная мощность  $S=2\text{kVA}$ ,



Рис. 2. Лабораторная установка для проведения экспериментальных исследований

Fig. 2. Laboratory installation for conducting experimental studies

частота  $f=50$  Гц, коэффициент трансформации  $U_1/U_2=1$ , напряжение к.з.  $u_k=3,6$  %, группа соединений обмоток  $Y/Z0-11$ ; к.п.д.  $\eta=97,0$  %; система охлаждения – естественное воздушное.

Расчет устройства произведен на основании методического руководства<sup>1</sup>.

Определяются основные электрические величины  $U_{1\phi}$ ;  $U_{2\phi}$ ;  $K_{12}$ ;  $I_{1\phi}$ ;  $I_{2\phi}$ . Номинальные фазные напряжения (для трехфазных трансформаторов, при условии, что  $U_{1\phi} = U_{2\phi}$ ):

$$U_{1\phi} = U_{2\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 129 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации  $K_{12}$  примем равным  $\approx 1$ . Номинальные линейные токи определим по принципу трехфазного трансформатора (при условии, что  $I_{1\phi} = I_{2\phi}$ ):

$$I_{1\phi} = I_{2\phi} = \frac{S}{U_{1\phi}\sqrt{3}} = \frac{2000}{220\sqrt{3}} = 5,3 \text{ А.}$$

Задаваясь КПД электромагнитного аппарата, определим общие потери мощности по принципу трехфазного трансформатора:

$$P_{\Sigma} = P_0 + P_k = \frac{100 - \eta}{\eta} \cdot P = \frac{100 - 97}{97} \cdot 2000 \approx 61,8 \text{ Вт.}$$

Электромагнитный аппарат устройства для симметрирования токов и напряжений приближен по типу к разделительным трансформаторам с воздушным охлаждением без регулировки напряжения. Тип магнитопровода выбран стержневым с вертикальными стержнями и концентрическими обмотками. При  $f=50$  Гц и при расчётном условии на минимум стоимости выбираем сталь марки 5112 толщиной 0,35 мм. Выберем предварительные значения магнитной индукции  $B_{\max} \approx 1,2$  Тл, плотности тока  $j_{\text{ср}} \approx 3,5$  А/мм<sup>2</sup>, коэффициентом заполнения окна  $k_{\text{ок}} \approx 0,33$  и коэффициентом заполнения магнитопровода  $k_{\text{ст}} \approx 0,9$  [20].

Далее воспользуемся упрощенным расчетом и определим предварительные значения площадей поперечных сечений проводов обмоток:

$$q_1 = q_2 = \frac{I_{1/2}}{j_{\text{ср}}} \approx 1,52 \text{ мм}^2.$$

По таблице стандартных сечений и диаметров проводов выбираем окончательные сечения проводов обмоток ( $q_1 = q_2 = 1,5394$  мм<sup>2</sup>), их диаметры без изоляции ( $d_1 = d_2 = 1,4$  мм) и их диаметры

<sup>1</sup> Сериков А. В. Расчет трансформаторов малой мощности: учебное пособие. – Комсомольск-на- Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 72 с.

тры с изоляцией ( $d_{\text{ил}} = d_{\text{ил}} = 1,48$  мм). Применяем провод марки ПТЭВ-2  $d=1,5$  мм с допустимой температурой нагрева  $130$  °С).

Определим поперечное сечение стержня сердечника (по стали):

$$Q_{\text{ст.расч.}} = C \cdot \sqrt{\frac{\alpha S}{fB_{\text{макс}}j_{\text{ср}}}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 2000}{50 \cdot 1,2 \cdot 3,5}} \approx 4,1 \text{ см}^2,$$

где  $C$  – постоянный коэффициент ( $C=0,6$ ),  $\alpha$  – отношение массы стали  $G_{\text{ст}}$  к массе меди  $G_{\text{м}}$  (при расчете на минимум массы принимаем  $\alpha = 5$ ),  $S$  – полная мощность первичной обмотки.

Полное поперечное сечение стержня с учетом междулистовой изоляции:

$$Q_{\text{полн.}} = \frac{Q_{\text{ст.расч.}}}{k_{\text{ст}}} = 4,5 \text{ см}^2.$$

Приближенное значение действующих ЭДС в обмотках:

$$E_1 = U \left( 1 - \frac{\Delta U_{1\%}}{100} \right) = 220 \left( 1 - \frac{3}{100} \right) \approx 213 \text{ В};$$

$$E_2 = U \left( 1 + \frac{\Delta U_{2\%}}{100} \right) = 220 \left( 1 + \frac{5}{100} \right) \approx 230 \text{ В},$$

где  $\Delta U_{\%}$  – падение напряжения в соответствующей обмотке при нагрузке в процентах от номинального напряжения.

ЭДС одного витка:

$$E_{\text{в}} = 4,44fB_{\text{макс}}Q_{\text{ст.расч.}} = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 4,1 \approx 1,09 \text{ В}.$$

Определим число витков обмоток электромагнитного аппарата по общему принципу, округляя до целого числа:

$$W_1 = \frac{E_1}{E_{\text{в}}} = \frac{213}{1,09} \approx 196 \text{ вит.}$$

$$W_2 = \frac{E_2}{E_{\text{в}}} = \frac{230}{1,09} \approx 211 \text{ вит.}$$

Площадь окна сердечника  $F_0$ , необходимая для размещения всех обмоток трансформатора, определяется по формуле:

$$F_0 = \frac{q_1 W_1 + q_2 W_2}{100k_{\text{ок}}} = \frac{2,776 \cdot 196 + 2,776 \cdot 211}{100 \cdot 0,33} = 34,19 \text{ см}^2.$$

К основным размерам сердечника относят высоту окна  $h$ , ширину окна  $s$ , ширину стержня  $a$ , толщину пакета  $b$ . Для выбора сердечника электромагнитного аппарата учитываем, что его форма и размеры оказывают значительное влияние на величину намагничивания, расход стали и меди. Для дальнейшего расчета принимаем оптимальное отношение  $b/a = 1,5$   $h/c = 2,5$ . Далее определим размеры магнитопровода.

$$b = \sqrt{Q_{\text{ст.расч.}}(b/a)} = \sqrt{4,1 \cdot 1,5} = 6,15 \text{ см};$$

$$h = \sqrt{F_0(h/c)} = \sqrt{34,19 \cdot 2,5} = 8,55 \text{ см};$$

$$a = \frac{b}{(b/a)} = \frac{6,15}{1,5} = 4,1 \text{ см};$$

$$c = \frac{h}{(h/c)} = \frac{85,5}{1,5} = 5,7 \text{ см.}$$

Уточненная магнитная индукция стержня:

$$B_c = B_{c,\text{расч.}} \frac{Q_{\text{ст.полн}}}{Q_c} = 1,19 \frac{4,5}{4,1} = 1,31 \text{ Тл;}$$

$$B_{c,\text{расч.}} = B_{\text{пред.}} \frac{W_{1\text{пред.}}}{W_1} = 1,2 \frac{195,6}{196} \approx 1,19 \text{ Тл.}$$

Размеры выбранного сердечника для стержневого трансформатора должны удовлетворять следующим требованиям. Площадь поперечного сечения стержня сердечника должна быть равна или близка к расчетной  $Q_c \approx Q_{\text{ст.полн.}}$ , а площадь окна должна быть достаточной для размещения обмоток  $hc \geq F_0$ . Условия выполняются.

Для проверки пригодности выбранного ранее сердечника определяется радиальная толщина обмоток трансформатора. Определим число витков первичной обмотки в одном слое  $n_1$ :

$$n_1 = \frac{h - 2h_{\text{из.1.}}}{d_{1\text{н}} \cdot k_{y1}} = \frac{85,5 - 2 \cdot 2}{1,48 \cdot 1,045} \approx 57 \text{ вит.},$$

где  $h_{\text{из.1}}$  – расстояние от обмотки до яра, мм,  $h_{\text{из.1}} = 2$  мм;  $K_{y1}$  – коэффициент укладки провода в осевом направлении,  $K_{y1} = 1,045$ .

Число слоев первичной обмотки  $m_1$  трансформатора составит:

$$m_1 = \frac{W_1/2}{2 \cdot n_1} = \frac{196/2}{2 \cdot 57} \approx 1,02 \approx 2 \text{ слоя.}$$

Толщина первичной обмотки  $\delta_1$  и вторичной обмотки составит:

$$\delta_1 = k_{y2} m_1 d_{\text{и}} + k_{\text{мс}} (m_1 - 1) \gamma_1 = 1,055 \cdot 1 \cdot 1,48 + 1,08(2 - 1)0,05 \approx 4,15 \text{ мм,}$$

где  $k_{y2}$  – коэффициент укладки обмотки в радиальном направлении,  $k_{y2} = 1,055$ ;  $k_{\text{мс}}$  – коэффициент неплотности междуслоевой изоляции определяется по кривым, в зависимости от диаметра провода и толщины изоляции  $k_{\text{мс}} = 1,08$ ;  $\gamma_1 = 0,05$ .

Аналогичные расчеты проведены для вторичной обмотки. По результатам расчета число витков вторичной обмотки в одном слое  $n_2 = 47$ , число слоев вторичной обмотки  $m_2 = 1,22 \approx 2$  слоя. Толщина первичной обмотки  $\delta_2 = 4,15$  мм.

Определяем наружные размеры каркаса катушки:

$$a_k = a + 2\Delta + 2h_{\text{из.осн}} k_b = 41 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1,5 \cdot 1 \approx 45 \text{ мм;}$$

$$b_k = b + 2\Delta + 2h_{\text{из.осн}} k_b = 61,5 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1,5 \cdot 1 \approx 65,5,$$

где  $k_{\text{мо}}$  – коэффициент неплотности междуобмоточной изоляции, равный 1,25;  $k_b$  – коэффициент выпучивания в радиальном направлении, равный 1;  $k_{\text{но}}$  – коэффициент неплотности намотки наружной изоляции принимается равным 1,7. Толщину каркаса принимаем равной 1,5 мм.

Применяем кабельную бумагу марки К-12 толщиной 0,12 мм в два слоя при величине рабочего напряжения первичной обмотки до 500 В,  $h_{\text{изос}} = 1,62$  мм.

Толщину наружной изоляции  $h_{\text{изм}}$  выбираем в соответствии с рабочим напряжением последней обмотки. При  $U < 500$  В наружную изоляцию выполняют из двух слоёв бумаги К-12 и одного слоя батистовой ленты толщиной 0,16 мм,  $h_{\text{изн}} = 0,4$  мм. Толщина изоляции между обмотками

определяется в зависимости от величины испытательного напряжения обмотки с наивысшим напряжением. При  $U_{исп}$  до 1600 В – соответственно три слоя К-12  $h'_{из.мо} = 2 \cdot 0,12 = 0,24$  мм.

Определим среднюю длину витка обмоток. Средняя длина витка обмоток в случае, когда обмотки намотаны на катушке в порядке: первая – вторая определим следующим образом:

$$l_{в.1} = 2(a_k + b_k) + 2\pi r_1 = 2(45 + 65,5) + 2 \cdot 3,14 \cdot 20,75 \approx 35 \text{ мм.}$$

$$l_{в.2} = 2(a_k + b_k) + 2\pi r_2 = 2(45 + 65,5) + 2 \cdot 3,14 \cdot 61,95 \approx 61,5 \text{ мм,}$$

где  $r_1$  и  $r_2$  средние радиусы закруглений обмоток

$$r_1 = \frac{\delta_1}{2} k_B = \frac{41,5}{2} \cdot 1 = 20,75 \text{ мм,}$$

$$r_2 = \left( \delta_2 + h_{из.мо} k_{мо} + \frac{\delta_2}{2} \right),$$

$$k_B = \left( 41,5 + 0,24 \cdot 1,25 + \frac{41,5}{2} \right) 1 = 61,95 \text{ мм.}$$

Определим массы меди первичных и вторичных обмоток по формуле.

$$G_{mi} = 8900 W_i q_i l_{в.1}.$$

По результатам расчета получены следующие величины  $G_{m1} \approx 1,002$  кг,  $G_{m2} \approx 1,280$  кг. Тогда суммарная масса всех обмоток  $\Sigma G_{m1} \approx 6,8$  кг.  $\Sigma$

Далее определим потери в меди обмоток электромагнитного устройства по принципу трансформатора (принимая коэффициент  $k_t = 2,84$ , зависящий от температуры провода марки ПТЭВ-2 с допустимой температурой нагрева 130 °С):

$$P_{M1} = k_t j_i^2 G_m 10^{-12} \approx 2,84 \cdot 3,5^2 \cdot 1,002 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \approx 104,57 \cdot 10^{-12} \text{ Вт;}$$

$$P_{M2} = k_t j_i^2 G_m 10^{-12} \approx 2,84 \cdot 3,5^2 \cdot 1,280 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \approx 176,57 \cdot 10^{-12} \text{ Вт;}$$

$$\Sigma P_M \approx 283,1636 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

Потери в стали 1512 определяем по формуле (величина удельных потерь  $P_{уд} = 8$  Вт/кг)

$$P_{ст} = P_{уд} G_{ст} = 8 \cdot 13,583 \approx 108,7 \text{ Вт,}$$

где  $G_{ст}$  масса стали, которая определяется по формуле ( $\gamma_{ст}$  – удельный вес стали принимаем равным 7800 кг/м<sup>3</sup>),

$$G_{ст} = \gamma_{ст} l_{ст} Q_{ст} = 7800 \cdot 0,387 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} = 13,583 \text{ кг,}$$

где  $l_{ст}$  – средняя длина силовых линий магнитного потока в сердечнике.

$$l_{ст} = 2(h + c + a) = 2(85,5 + 57 + 51) = 387 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

На основании произведенных расчетов конструктивных параметров изготовлена физическая модель предлагаемого СУ с саморегулируемой индуктивностью, общий вид которой представлен на рис. 3.

Исследования с разработанной моделью СУ производились при его включении в различных узлах отбора мощности, находящихся на разных расстояниях от шин источника питания. Эти





Рис. 3. Общий вид физической модели предлагаемого СУ с саморегулируемой индуктивностью  
Fig. 3. General view of the BD physical model proposed with self-regulating inductance

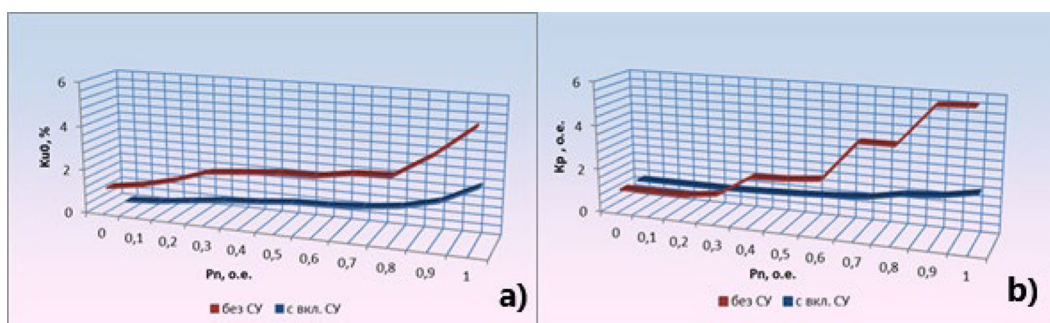


Рис. 4. Нагрузочные диаграммы изменения исследуемых показателей: а) коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности, б) коэффициента потерь  
Fig. 4. Load diagrams of the studied indicators changes: a) the zero-sequence voltage unbalance coefficient, b) the loss coefficient

расстояния имитировались активными и реактивными сопротивлениями, разбивая исследуемую модель КНСЭС на 4 участка с 4 узлами отбора мощности, в которых включалась однофазная, двухфазная и трехфазная несимметричная нагрузка разной мощности.

Анализ полученных результатов исследований позволил установить, что наибольшая эффективность действия СУ проявляется при его включении в 1 узле отбора мощности (рис. 4). Анализ графиков, представленных на рис. 4, показал, что среднее значение  $K_{0U}$  (рис. 4а) при его изменении в зависимости от мощности несимметричной нагрузки при отсутствии СУ составляет 2,7 % (максимальное значение – 5,66 %). При включении СУ среднее значение этого коэффициента составило 0,8 % (снижение почти в 3,5 раза). При отсутствии СУ максимальное значение коэффициента  $K_p$  составило 5,99, а его среднее значение – 2,83. При включении СУ среднее значение  $K_p$  составило 1,2. Таким образом, эффект симметрирования составил 57,6 %.

**Заключение.** На основании произведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. По результатам расчета получены следующие величины  $G_{M1} \approx 1,002$  кг,  $G_{M2} \approx 1,280$  кг. Тогда суммарная масса всех обмоток ШС несбалансированность электропотребления, вызывающая несимметрию токов и напряжений в трёхфазных низковольтных системах электроснабжения, в значительной степени снижает качество электрической энергии и приводит к увеличению ее дополнительных потерь.

2. Возрастание тепловых потерь энергии приводит к возникновению пожароопасных ситуаций и значительно снижает уровень надежности электроснабжения, вызывая аварийные ситуации при доставке электрической энергии потребителю.

3. Наиболее эффективным средством минимизации последствий несимметричных режимов может служить предлагаемая конструкция симметрирующего устройства, обеспечивающего автоматическое регулирование его мощности при изменяющемся уровне несбалансированного электропотребления. При этом эффективность симметрирования такого устройства близка к 60 %.

### Список литературы / References

[1] Абдиева З. Э. Оценка влияния несимметрии нагрузки на потери электрической энергии в сетях 0,4 кВ, *Энергетика. Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*, 2014, 32(1), 157–159. [Abdieva Z. E. Evaluation of the effect of load asymmetry on electrical energy losses in 0.4 kV networks, *Energetika. Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*, 2014, 32(1), 157–159 (in Rus.)].

[2] Амелькина Н. А., Бодрухина С. С., Цырук С. А. Определение фактического вклада асимметричных потребителей в искажение качества электроэнергии в точке общего подключения, *Электрик*, 2005, 4, 17–21. [Amelkina N. A., Bodrukhina S. S., Tsyruk S. A. Determination of the actual contribution of asymmetric consumers to the distortion of the quality of electricity at the point of common connection, *Electrician*, 2005, 4, 17–21 (in Rus.)].

[3] Айтбаев Н. А., Гайыбов Т. С. Оптимизация режимов электросети по напряжению узлов с регулируемыми реактивными мощностями, *Республиканская научно-техническая конференция*, Ташкент, 2018, 216–218. [Aitbayev N. A., Gayuybov T. S. Optimization of power grid modes by voltage of nodes with controlled reactive capacities, *Republican Scientific and Technical Conference*, Tashkent, 2018, 216–218 (in Rus.)].

[4] Ануфриев А. И., Платонов И. Ю., Агеев В. А. и др. Анализ асимметрии и отклонения напряжения в распределительных сетях 0,4 кВ, *Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвузовский сборник научных трудов*, Саранск, 2016, 186–190. [Anufriev A. I., Platonov I. Yu., Ageev V. A. et al. Analysis of asymmetry and voltage deviation in 0.4 kV distribution networks, *Energy-efficient and resource-saving technologies and systems: Interuniversity collection of scientific papers*, Saransk, 2016, 186–190 (in Rus.)].

[5] Боярская Н. П., Кунгс Я. А., Темербаев С. А. и др. Проблемы обеспечения качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ, *Ползуновский вестник*, 2012, 4, 89–94. [Boyarskaya N. P., Kungs Ya. A., Temerbaev S. A. et al. Problems of ensuring the quality of electricity in urban distribution networks of 0.4 kV, *Polzunovsky Vestnik*, 2012, 4, 89–94 (in Rus.)].

[6] Гольдштейн В. Г., Сливкин В. Г. Анализ электромагнитной совместимости низковольтных электроприемников с асимметричными режимами работы высоковольтных электрических сетей, *Вестн. Сам. гос. тех. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки.*, 2002, 16, 205–208. [Goldstein V. G., Slivkin V. G. Analysis of electromagnetic compatibility of low-voltage electrical receivers with asymmetric modes of operation of high-voltage electrical networks, *Vestn. Sam. gos. tech. un-ta. Ser. Phys.-mat. Sciences.*, 2002, 16, 205–208 (in Rus.)].

[7] Жилин М. И., Воркунов О. В. Повышение качества электрической энергии. *Приоритетные направления развития науки. Сборник статей по материалам международной*

научно-практической конференции в 2 частях, М., ООО «Научное партнерство «Апекс», 2017, 83–85. [Zhilin M. I., Vorkunov O. V. Improving the quality of electrical energy. *Priority directions of science development. Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference in 2 parts*, Moscow: LLC “Scientific Partnership “Apex”, 2017, 83–85 (in Rus.)].

[8] Килин С. В., Вендин С. В. Анализ несинусоидальности и асимметрии в электрических сетях 0,4–10 кВ. *Проблемы электрификации сельского хозяйства: сборник научных трудов по материалам Всероссийского НПК*, Ярославль, 2018, 15–21. [Kilin S. V., Vendin S. V. Analysis of non-sinusoidality and asymmetry in 0.4–10 kV electrical networks. *Problems of electrification of agriculture: collection of scientific papers based on the materials of the All-Russian NPC*, Yaroslavl, 2018, 15–21 (in Rus.)].

[9] Наумов И. В., Бастрон А. В. Исследование несимметричных режимов работы внутренних электрических сетей индивидуальных жилых домов в сельской местности, *Вестник НГИЭИ*, 2022, 6(133), 44–58. [Naumov I. V., Bastron A. V. Investigation of asymmetric modes of operation of internal electrical networks of individual residential buildings in rural areas, *Bulletin of the NGIEI*, 2022, 6(133), 44–58 (in Rus.)].

[10] Наумов И. В. К вопросу управления несимметричными режимами работы распределительных электрических сетей 0,38 кВ, *Промышленная энергетика*, 2022, 5, 2–14. [Naumov I. V. On the issue of controlling asymmetric modes of operation of 0.38 kV distribution electric networks, *Industrial Power engineering*, 2022, 5, 2–14 (in Rus.)].

[11] Naumov I. V. Additional power losses in low-voltage electrical networks and their influence on people, *International Conference on Research Paradigms Transformation in Social Sciences. The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences EpSBS. Future Academy ISSN: 2357–1330*, 844–853. <https://dx.doi.org/10.15405/epsbs.2018.12.103>.

[12] Naumov I. V., Podyachikh S. V. On the choosing the installation location the balancing devices in low-voltages distribution electric networks, *APITECH III 2021, IOP Publishing / Journal of Physics: Conference Series*.2094 (2021) 052012. DOI: 10.1088/1742–6596/2094/5/052012, 1–9.

[13] ГОСТ 32144–2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения/ Дата введения 2014.07.01. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301>[GOST 32144–2013. Interstate standard. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of quality of electric energy in general-purpose power supply systems/ Date of introduction 2014.07.01. [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (in Rus.)].

[14] Наумов И. В. Метод и программа расчёта потерь мощности и показателей несимметрии токов и напряжений в распределительной сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством, *Мех. и электр. соц. сельск. хоз-ва.*, 1989, 3, 30. – реф. деп. рук., 22 ВС-89 Деп. [Naumov I. V. Method and program for calculating power losses and indicators of asymmetry of currents and voltages in a 0.38 kV distribution network with a symmetrical device, *Mech. and electric social rural. khoz-va.*, 1989, 3, 30. – ref. Dep. Ruk., 22 VS-89 Dep. (in Rus.)].

[15] Наумов И. В. Оптимизация несимметричных режимов системы сельского электроснабжения. *Теоретические обобщения, монография*, Иркутск, издательство "ИрГСХА", 2001,

217. [Naumov I. V. Optimization of asymmetric modes of the rural power supply system. *Theoretical generalizations, Monograph*, Irkutsk, publishing house «IrGSHA», 2001, 217 (in Rus.)].

[16] Наумов И. В. Несимметричные режимы работы распределительных электрических сетей, *монография*. Издательство ИрГСХА, Иркутск, 2014, 152. [Naumov I. V. Asymmetric modes of operation of distribution electrical networks, *Monograph*. Ir GSHA Publishing House, Irkutsk, 2014, 152 (in Rus.)].

[17] Наумов И. В., Карамов Д. Н. К вопросу о возникновении пожароопасных ситуаций при несимметричном электропотреблении, *Надежность и безопасность энергетики*, 2021, 14(1), 69–76. [Naumov I. V., Karamov D. N. On the issue of the occurrence of fire-hazardous situations with asymmetric power consumption, *Reliability and safety of energy*, 2021, 14(1), 69–76 (in Rus.)].

[18] Наумов И. В. К вопросу о пожарной безопасности при строительстве индивидуальных жилых домов, *Известия Вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*, 2022, 12(3), 350–361. [Naumov I. V. On the issue of fire safety in the construction of individual residential buildings, *Izvestiya Vuzov. Investment. Construction. Real estate*, 2022, 12(3), 350–361(in Rus.)].

[19] Сведения о техническом состоянии сетей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301>. [Information about the technical condition of the networks. [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301>(in Rus.)].

[20] Шидловский А. К., Кузнецов В. Г., Мостовяк И. В., Самков А. В. Симметрирующее устройство для трёхфазной четырёхпроводной электрической сети, *Патент SU 982146A1* от 15.12.1982 г. [Shidlovsky A. K., Kuznetsov V. G., Mostovyak I. V., Samkov A. V. A symmetrical device for a three-phase four-wire electrical network, *Patent SU 982146A1* dated 12/15/1982(in Rus.)].

[21] Буренин В. В. и др. Устройство симметрирования напряжения в высоковольтных сетях / *Патент RU 188396U 1* от 11.04.2019 г. [Burenin V. V. et al. Voltage balancing device in high-voltage networks / *Patent RU 188396U 1* dated 11.04.2019(in Rus.)].

[22] Наумов И. В., Иванов Д. А., Подъячих С. В., Гантулга Д. Симметрирующее устройство для трёхфазных сетей с нулевым проводом, Патент на изобретение № 2490768. Зарегистрирован в Госреестре изобретений РФ от 20 августа 2013 г. [Naumov I. V., Ivanov D. A., Podyachikh S. V., Gantulga D. Symmetrical device for three-phase networks with zero wire, *Patent for invention No. 2490768*. Registered in the State Register of Inventions of the Russian Federation on August 20, 2013(in Rus.)].