

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.316.11

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-212-6-90-104

И.В. Наумов, А.А. Багаев

I.V. Naumov, A.A. Bagaev

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ НЕСИММЕТРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В СЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,38 КВ ПРИ МНОГОСТУПЕНЧАТОМ ОТБОРЕ МОЩНОСТИ

UNBALANCED POWER CONSUMPTION MODES MODELING IN RURAL DISTRIBUTION 0.38 KV ELECTRIC NETWORKS WITH MULTI-STAGE POWER TAKE-OFF

Ключевые слова: качество электроэнергии, коэффициент потерь мощности, показатели несимметрии, симметрирующее устройство, дополнительные потери мощности, коэффициенты несимметрии токов и напряжений по обратной и нулевой последовательности.

Целью статьи является моделирование несимметричных режимов работы электрических сетей (ЭС) низкого напряжения. В качестве модели рассматривается ЭС напряжением 0,38 кВ с силовым трансформатором 10/0,4 кВ и линией электропередачи (ЛЭП), имеющей 6 узлов отбора мощности. В каждом из узлов располагаются трёхфазные несимметричные и симметричные электроприемники, создающие несимметричный приток мощности в ЭС общего присоединения. Исследование эффекта симметрирования режима работы ЭС моделируется возможностью подключения в каждый из рассматриваемых узлов нагрузки специального симметрирующего устройства (СУ). Для достижения цели исследования сформулирован ряд задач, включающих разработку модели сети, программного обеспечения и технического средства симметрирования режимов работы сельских распределительных ЭС, а также анализ показателей несимметрии при наличии и отсутствии в ЭС СУ. В качестве методов и инструментов исследования использованы: метод симметричных составляющих, высокоуровневый язык программирования MATLAB, а также методы численного анализа. На основании использования разработанного метода и Программного комплекса произведены расчеты исследуемых показателей качества и коэффициента, характеризующего дополнительные потери электроэнергии, обусловленные несимметричным электропотреблением. Результаты исследования позволили сформулировать выводы и рекомендации, устанавливающие эффектив-

ные технические средства симметрирования несимметричных режимов, а также наиболее целесообразное место установки этих средств в распределительной ЭС. Представленные результаты и их обсуждение могут быть полезны инженерно-техническому персоналу электросетевых организаций и научным работникам, занимающимся нормализацией режимов работы потребителей ЭС низкого напряжения.

Keywords: power quality, power loss factor, unbalance indices, balancing device, additional power losses, current and voltage unbalance factors in reverse and zero sequence.

The research goal is to simulate unbalancing operation modes of low voltage electrical networks (EN). As a model, an EN with a 0.38 kV voltage with a 10/0.4 kV power transformer and a power transmission line (PTL) with 6 power take-off nodes are considered. In each of the nodes, there are three-phase unbalanced and symmetrical electric receivers that create an unbalanced power flow into the EN of the general connection. The symmetrizing effect study of the EN operating mode is modeled by the possibility of a special balancing device (BD) connecting to each of the load nodes under consideration. To achieve the research goal, a number of tasks were formulated including the network model development, software and technical means for the balancing operation modes of the rural distribution EN as well as the unbalance indicator analysis when the BD presence and absence in the EN. The following methods and research tools are used: the method of symmetric components, the high-level programming MATLAB language as well as numerical analysis methods. Based on the use of the developed method and the software package, the studied quality indices and the coefficient are calculated; they characterize the additional electricity losses

due to unbalanced power consumption. The research findings made it possible to formulate conclusions and recommendations that establish effective technical means of symmetrizing unbalancing modes as well as the most appropriate place to install these means in a distribution EN.

The presented results and their discussion may be useful to the engineering and technical personnel of power grid organizations and researchers involved in the normalization of low-voltage consumer EN operating modes.

Наумов Игорь Владимирович, д.т.н., профессор, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: professornaumov@list.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4767-0127>.

Naumov Igor Vladimirovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: professornaumov@list.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4767-0127>.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Bagae710@mail.ru.

Bagae710@mail.ru, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Bagae710@mail.ru.

Введение

Многочисленными исследованиями установлено, что реальные режимы функционирования распределительных электрических сетей напряжением 0,38 кВ объективно несимметричны [1-9]. Это связано в основном со статистической несимметрией фазных токов, обусловленной неравномерным характером распределения однофазных электроприемников (ЭП) по фазам 3-фазной 4(5)-проводной ЭС, а также случайным характером коммутаций этих ЭП в течение времени суток. Безусловно, есть и другие причины, например, аварийные ситуации, связанные с возникновением неполнофазных режимов (обрывы питающих ЛЭП, повреждения в ЭС потребителей, подключенных к общей сети 0,38 кВ и пр.). Но в основном это указанные первые две причины. Теория электрических цепей [10, 11] определяет отличительные признаки несимметричных режимов – возникновение симметричных составляющих токов и напряжений, соответственно, прямой, обратной и нулевой последовательностей. При этом каждая указанная последовательность создает дополнительные потери мощности и в значительной степени изменяет качественный состав электрической энергии (ЭЭ), нарушая требования установленного Стандарта¹. В соответствии с [12] дополнительные потери можно оценить посредством коэффициента потерь, устанавливающего связь между потерями несимметричного режима и по-

терями, обусловленными только токами прямой последовательности:

$$K_p = 1 + \left(\frac{I_{2UNB.}}{I_{1UNB.}} \right)^2 + K_r \cdot \left(\frac{I_{0UNB.}}{I_{1UNB.}} \right)^2,$$

где $I_{1UNB.}$, $I_{2UNB.}$ и $I_{0UNB.}$ – симметричные составляющие токов, соответственно, прямой, обратной и нулевой последовательностей;

K_r – коэффициент, представляющий собой отношение сопротивления нулевой последовательности исследуемой линии к ее сопротивлению прямой последовательности.

Качество электрической энергии, измененное в результате несимметричного электропотребления, оценивается показателями, устанавливаемыми Стандартом по следующим выражениям:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{nom.}} \cdot 100\%;$$

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_0}{U_{nom.}} \cdot 100\%,$$

где K_{2U} и K_{0U} – коэффициенты несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям;

$U_{nom.}$, U_2 и U_0 – номинальное напряжение, напряжения обратной и нулевой последовательностей соответственно.

Увеличение значений указанных показателей негативно влияет на работу всевозможных ЭП, подключенных к ЭС, где нарушена равномерность электропотребления. Многочисленные литературные отечественные и зарубежные источники отмечают значительное снижение производительности групп ЭП в технологических процессах сельскохозяйственного производства и в индивидуальных жилых домах граждан [13-19]. Кроме того, исследования, которые мы осуществляем в течение длительного ряда лет, позволили установить, что изменение коэффи-

¹ ГОСТ 32144-2013. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. НОРМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ/ Дата введения 2014-07-01. Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301>. Дата обращения: 25.03.2022.

циента потерь в несимметричном режиме увеличивает дополнительное электропотребление, что оказывает влияние на стоимость расчетов за использованную ЭЭ, и, кроме того, создает опасность возникновения пожароопасных ситуаций на сельскохозяйственном производстве и в быту населения [20, 21].

Целью статьи является моделирование различных ситуаций несимметричного электропотребления, имитирующих работу сельских распределительных сетей 0,38 кВ. Для достижения указанной цели сформулирован ряд вопросов, необходимых для рассмотрения:

- характеристика современных принципов выполнения систем сельского электроснабжения;
- особенности несимметричного электропотребления, осуществляемого при моделировании процесса отбора мощности несимметричной нагрузкой;
- характеристика модели сети 0,38 кВ;
- разработка технического средства для минимизации несимметричных потоков;
- разработка программного комплекса для расчета несимметричных режимов;
- анализ эффективности применения СУ для нормализации качества и снижения потерь, обусловленных несимметричным электропотреблением.

Результаты исследования

В соответствии с указанными задачами для достижения поставленной цели произведены исследования, результаты которых приведены ниже.

Характеристика современных систем электроснабжения сельских потребителей. Основными требованиями, предъявляемыми к системам электроснабжения, как и прежде, является выполнение правил и норм надежности электрообеспечения, доставка потребителям ЭЭ надлежащего качества на основе минимальной затратности построения элементов электрических сетей.

Как правило, современная система сельского электроснабжения для обеспечения ЭЭ населенных пунктов состоит из ЭС трех классов напряжения: 35, 10 и 0,38 кВ. При этом центром питания узла сельскохозяйственных нагрузок, в котором могут находиться один или несколько населенных пунктов, является районная трансформаторная подстанция (ПС) 35/6-10 кВ (реже 110/6-10 кВ). От шин такой ПС могут получать

несколько распределительных пунктов (РП) 6-10 кВ, от которых по радиально-магистральным связям происходит питание поселковых трансформаторных ПС 6-10 кВ.

Отличительной особенностью современных поселковых сетей является построение электрических сетей по принципу увеличения количества ПС 6-10/0,4 кВ (при уменьшении их номинальной мощности), питающих ограниченное количество индивидуальных жилых хозяйств (ИЖД). Кроме того, в силу использования самонесущих изолированных проводов (СИП), представляющих собой воздушно-кабельные электрические связи, появляется возможность увеличения радиальных связей от шин 0,4 кВ ПС 10/0,4 кВ.

Все это приводит к значительному сокращению протяженности магистральных участков линий электропередачи (ЛЭП) 0,38 кВ. В результате этого вместо 3-4 отходящих от каждой ПС ЛЭП 0,38 кВ (при использовании голых проводов) в настоящее время может отходить до 10-12 воздушно-кабельных связей, питающих ИЖД сельских жителей, имеющих незначительную протяженность. Такие изменения, происшедшие за последние 10 лет в проектировании и построении сельских ЭС, позволили повысить качество ЭЭ и надежность ее передачи. При этом практически повсеместно стали исчезать протяженные неполнофазные ответвления в сельских сетях, создававшие в недавнем прошлом значительные проблемы с качеством и дополнительными потерями ЭЭ [6].

Таким образом, новые конструкционные материалы, а также новые подходы к проектированию современных сельских электрических сетей позволили повысить эффективность сельской электропередачи. Вместе с этим объективный характер несимметричного электропотребления в этих ЭС не снизился, отчасти даже увеличился, в силу увеличения мощности отдельных современных ЭП, используемых в обиходе населением.

Разработка средства симметрирования. Рекомендуемые меры перераспределения однофазных электроприемников в трёхфазной системе, с целью уравнивания токовой нагрузки отдельных фаз, практически не имеют применения, поскольку трудоемки и связаны со значительными временными затратами. Вследствие этого наиболее эффективным способом является установка в электрической сети специ-

альных технических средств, названных симметрирующими устройствами (СУ).

В литературных источниках описываются различные виды СУ, предлагаемые к использованию в сельских распределительных сетях, напряжением 0,38 кВ. Первая группа устройств [22-25] представлена различными схемными решениями, реализованными только в авторских свидетельствах и патентах. Изготовление СУ на промышленной основе осуществляется только для двух типов: ТМГСУ (трансформатор масляный, герметизированный, со встроенным СУ) [26], а также симметрирующих трансформаторов [27], образующих вторую группу. Отличительной особенностью этих СУ является тот факт, что подавляющая часть этих устройств имеет минимально возможное сопротивление токам нулевой последовательности, которые могут замыкаться через указанное СУ между несимметричной нагрузкой и точкой подключения СУ в ЭС. При этом создается колебательный контур для тока в нейтральном проводнике, равного $3I_{0UNB}$. При этом все эти СУ (и первая и вторая группы) имеют один существенный недостаток – нерегулируемые параметры, что затрудняет их использование в тех ЭС, где происходит изменение мощности несимметричной нагрузки в достаточно широких пределах. А это именно те ЭС, от которых получают питание большинство коммунально-бытовых потребителей в виде ИЖД сельского населения. Поэтому в режимах минимальной несимметрии потребление излишков мощности обуславливает значительные потери активной энергии в самом устройстве, снижая эффект симметрирования.

Кроме того, фиксирование СУ на шинах силового трансформатора (СТ) [26-27] приводит к тому, что создается искусственное уменьшение сопротивления нулевой последовательности на шинах 0,4 кВ. И если качество ЭЭ, обусловленное снижением показателя K_{0U} , действительно повышается, то дополнительные потери активной мощности будут увеличиваться за счет постоянной циркуляции потоков нулевой последовательности между несимметричной нагрузкой и вторичной обмоткой СТ. В своих исследованиях разрабатываем СУ с регулируемыми параметрами [28, 29]. Они обладают прекрасной эффективностью за счет того, что могут значительно снижать свою мощность (вплоть до отключения) в режимах минимальной несимметрии токов. Но и эти СУ имеют существенный недостаток, заключающийся в необходимости схемы автоматического управления разной степени сложности. В связи со сказанным наибольшей эффективностью будут обладать СУ, автоматически изменяющие свои параметры при непосредственном изменении несимметричных потоков, но не имеющие никаких дополнительных устройств автоматики (контактных или бесконтактных). Примером такого устройства может быть СУ [30] или СУ, находящееся в настоящее время на рассмотрении Патентного бюро РФ (рис. 1).

Следует отметить, что электрическая схема СУ была предложена учеными Киевского института электродинамики в 1986 г., разработанная на основе схемы «нейтраллера», предложенного в 1947 г. инженером А.А. Куликовским [31].

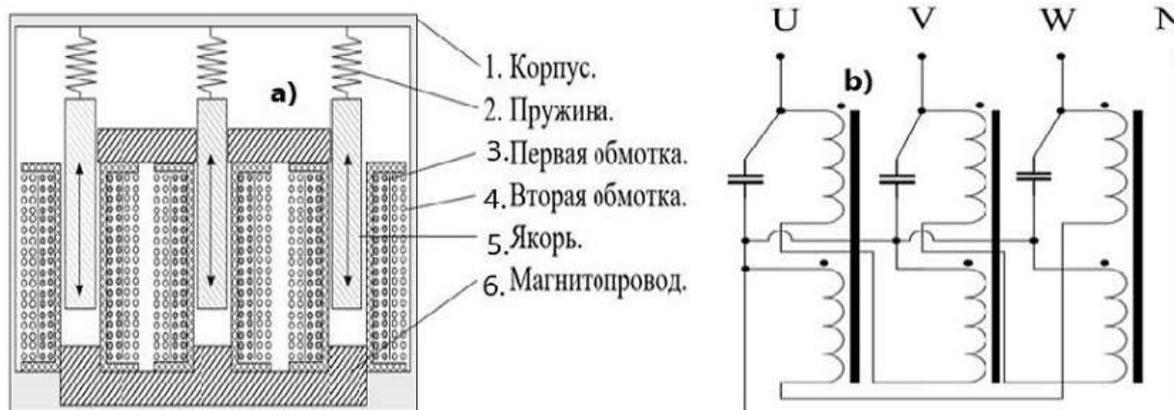


Рис. 1. Симметрирующее устройство с саморегулируемой индуктивностью (разработано автором): а – конструктивное исполнение; б – электрическая схема

Преимуществом предлагаемого СУ является то, что проводимость катушек индуктивности, следовательно, и мощность устройства, саморегулируется проходящим через неё током нулевой последовательности, и при минимальном (пороговом) значении уровня несимметричного электропотребления может быть отключено от электрической сети посредством коммутационного аппарата. Исходя из сказанного параметры устройства отстраиваются именно от токов прямой и нулевой последовательности. На основе использования методов, описанных в [25], параметры СУ можно определить по выражениям:

$Z_{BD1} = Z_{BD2} = 2r \cdot \sqrt{1 + q^2}$, $Z_{BD0} = 2r_0$,
где r и r_0 – соответственно, активные сопротивления прямой (обратной) и нулевой последовательностей СУ;

q – добротность катушки индуктивности, которая для электромагнитных СУ со стальным сердечником составляет 6-8.

Сопротивления r и r_0 легко определяются на основании расчета симметричных составляющих токов и напряжений, создаваемых несимметричной нагрузкой. Расчет этих показателей несимметрии токов и напряжений производится в соответствии с методом [25]. Принимая добротность, равную в среднем 7, параметры СУ в каждый момент изменения несимметричной нагрузки будут изменяться в соответствии с выражениями:

$$Y_{BD1} = Y_{BD2} = \frac{1}{(2 \cdot \frac{U_1}{I_1}) \cdot 7,0714};$$

$$Y_{BD0} = 2 \cdot \left(\frac{3 \cdot I_0}{U_0} \right), \quad (1)$$

где $U_1 = U_{1UNB.}$, $I_1 = I_{1UNB.}$ and $U_0 = U_{0UNB.}$, $I_0 = I_{0UNB.}$ – симметричные составляющие напряжения и тока прямой и нулевой последовательностей несимметричной нагрузки, значения которых, а также значения всех остальных показателей несимметрии токов и напряжений определяются в соответствии с методом [25].

Разработка модели электрической сети 0,38 кВ. Преимуществом моделирования про-

цессов электропередачи является возможность имитирования любых ситуаций, связанных с отбором мощности в рассматриваемых узлах нагрузки. При этом в таких узлах можно рассматривать модели расположения любых сочетаний нагрузок, создающих несимметричные потоки мощности: трёх-, двух- и однофазные. Также можно предусмотреть участие в процессе электропотребления трехфазных симметричных электроприемников (двигателей).

Разработанный метод определения показателей несимметрии токов и напряжений в электрической сети при отсутствии СУ и его включения в любом из узлов отбора мощности [25] позволяет рассматривать ЭС с любым количеством таких узлов. Рассмотрим ЭС с 6 узлами отбора мощности, протяженностью 600 м (рекомендуемая максимальная длина магистральных участков ЛЭП для современных систем сельского электроснабжения). Предполагаем, что в каждом из рассматриваемых 6 узлов находится трехфазная несимметричная, а также трёхфазная симметричная нагрузки. ЛЭП 0,38 кВ, выполненная посредством СИП, получает питание от шин СТ 0,4 кВ. В свою очередь, СТ 10/0,4 получает ЭЭ по воздушной ЛЭП 10 кВ, выполненной голым сальным проводом. Схема замещения такой модели сети 0,38 кВ представлена на рисунке 2, где на схеме обозначено: Z_{LH} – 10 кВ, выполненная проводом ЗАС35 мм², длина которой принята по нормам надежности, равной не более 20 км [32]. Полные комплексные сопротивления прямой (обратной) последовательностей этой ЛЭП равны, соответственно: $Z_{LH1} = Z_{LH2} = 0,0243 + j 0,01$ Ом. Z_{TS} – силовой трансформатор 10/0,4 кВ, мощность которого принята на основании осуществленного анализа по силовым трансформаторам и их загрузкам в сельской местности, равная 160 кВА. Его полные комплексные сопротивления прямой (обратной) и нулевой последовательностей равны, соответственно: $Z_{TS1} = Z_{TS2} = 0,016 + j 0,0417$ Ом, $Z_{TS0} = 0,1508 + j 0,3670$ Ом.

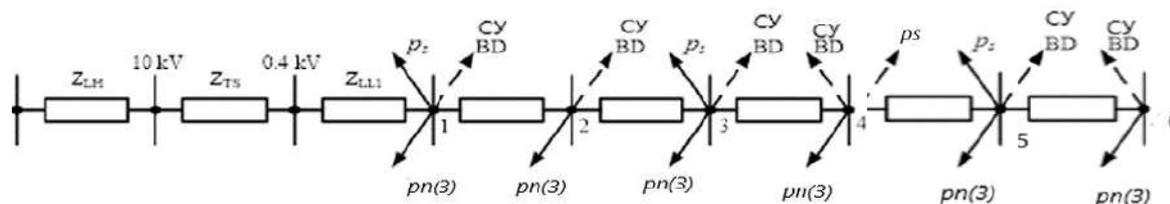


Рис. 2. Схема замещения участка электрической сети 0,38 кВ (разработано автором)

От шин 0,4 кВ СТ отходит ЛЭП, выполненная СИП 2А, сечением 3х25+1х35 мм². Полные комплексные сопротивления прямой (обратной) и нулевой последовательностей равны, соответственно: $Z_{LL1}=Z_{LL2}=1,2+j0,0826$ Ом, $Z_{LLO}=0,986+j0,0703$ Ом. Линия 0,38 кВ равномерно распределена на 6 участков по 100 м, в конце каждого из которых расположен узел нагрузок. В каждом узле нагрузок подключаются: трёхфазная несимметричная нагрузка, относительная мощность которой изменяется в соответствии с таблицей 1 [25].

Таблица 1

Изменение модулей относительных мощностей трёхфазных несимметричной и симметричной нагрузок в узлах

P_a	P_b	P_c	P_s	$P_n = P_a + P_b + P_c$
0,0177	0,00425	0,0030	0,225	0,025
0,0355	0,00850	0,0060	0,200	0,050
0,0532	0,0125	0,0091	0,175	0,075
0,0709	0,01700	0,0121	0,150	0,100
0,0887	0,02125	0,0151	0,125	0,125
0,1064	0,02550	0,0181	0,100	0,150
0,1241	0,02980	0,0211	0,075	0,175
0,1419	0,04000	0,0241	0,050	0,200
0,1596	0,03830	0,0272	0,025	0,225
0,1773	0,04250	0,0302	0,000	0,250

При этом модули относительных значений мощностей в фазах и симметричной нагрузки представляют собой отношение соответствующих активных мощностей к суммарной полной мощности величины. Аргументы комплексного значения мощностей равны, соответственно: для каждой из фаз – 25,84°, для трехфазной симметричной нагрузки – 36,87°. Наибольшая нагрузка будет наблюдаться в ближайшем к шинам источника питания узле, при этом каждому изменению нагрузки (10 значений) соответствует суммарное значение: $p_l+p_s=1,5$ (p_l – суммарная трехфазная несимметричная нагрузка; p_s – трёхфазная симметричная нагрузка). По мере удаления от шин СТ нагрузка в узлах уменьшается, и в последнем, 6-м, узле общая нагрузка фаз будет соответствовать значениям таблицы 1.

Параметры СУ рассчитываются для каждой точки изменения несимметричной нагрузки по выражениям расположено в любой точке рассматриваемой сети (рис. 2), в том числе на шинах 0,4 кВ СТ.

Разработка программного обеспечения несимметричных режимов. В основе программного обеспечения, названного для данной статьи «Unbalance_6», лежит метод, разработанный и описанный в [25]. Программа написана на высокоуровневом языке программирования MATLAB и состоит из нескольких алгоритмических блоков (соответствующих количеству узлов отбора мощности), каждый из которых содержит следующие алгоритмы:

- алгоритм ввода исходных данных по каждому участку сети и узлу, алгоритм расчетных операций определения симметричных составляющих токов и напряжений и исследуемых показателей без СУ;

- алгоритм определения параметров СУ для каждого варианта изменяющейся несимметричной нагрузки;

- алгоритм определения исследуемых параметров с СУ.

Кроме того, Программа содержит ряд алгоритмов, в которых используются технологии графического редактора MATLAB для построения нагрузочных и других видов диаграмм, визуализирующих изменение исследуемых показателей от зависимого параметра. В качестве примера на рисунке 3 представлен фрагмент реализации

Рисунок 3 представляет лишь фрагмент Программы, реализующий принцип ее архитектуры, скомпилированный из отдельных расчетных алгоритмов.

На основании составленных исходных данных, с использованием Программы произведен расчет исследуемых показателей в каждом из узлов нагрузок и осуществлен их анализ.

Результаты расчета и анализа. Исследование эффективности использования СУ в различных точках его подключения в исследуемой модели будем осуществлять, поочередно включая СУ: на шины СТ, в 1-м узле отбора мощности, в 3-м узле и последнем, 6-м.

1. СУ на шинах силового трансформатора. На рисунке 4 представлены диаграммы изменения коэффициентов несимметрии напряжений в исследуемых узлах. При этом на каждой из 6 нагрузочных диаграмм этого рисунка сравниваются значения исследуемых показателей при отсутствии в сети СУ и включении его на шинах СТ. Анализ изменения этих показателей показал следующее. При отсутствии СУ в электрической сети коэффициент K_{2u} , изменяясь в

интервале изменения несимметричной нагрузки (pn) от минимальных до максимальных значений, имеет следующие средние значения в узлах: в 1-м узле – 0,025; 2-м – 0,067; 3-м – 0,095;

```
Uf = 220; Uf_f = 380; zt = complex(0.016,0.0417);
zt0= complex(0.1508,0.3670); a = complex(-0.4991,0.8666);
e = complex(-1,0.0016); K2s= complex(0.17,0.24);
n = complex(25,0,0,0); Kr= 1+(3.*0.986)/1.2;
pa1=6.*(complex(threfase(:,1).*cos(threfase(:,6).*
3.14./180),threfase(:,1).*sin(threfase(:,6).*3.14./180)));
pb1 = 6.*(complex(threfase(:,2).*cos(threfase(:,7).*3.14./180),
threfase(:,2).*sin(threfase(:,7).*3.14./180)));
pc1 = 6.*(complex(threfase(:,3).*cos(threfase(:,8).*
3.14./180),threfase(:,3).*sin(threfase(:,8).*3.14./180)));
ps1 = 6.*(complex(threfase(:,4).*cos(threfase(:,9).*3.14./180),
threfase(:,4).*sin(threfase(:,9).*3.14./180)));
pn1 = 6.*threfase(:,5);
MKOIL_1 = sqrt((real(KOIL_1)).^2+(imag(KOIL_1)).^2);
Kp1_1 = 1+(MK2IL_1).^2+Kr.*(MKOIL_1).^2);
K2UX_1 = YK1_1.*Yee1_1.*YT_1./YR1_1;
MK2UX_1 = sqrt((real(K2UX_1)).^2+(imag(K2UX_1)).^2);
KOUX_1 = YL1_1.*Yee1_1.*Yx_1.*YU_1./(Yx0_1.*YR1_1);
```

Рис. 3. Фрагмент Программы «Unbalance_6» (разработано автором)

При включении СУ на шинах СТ значение показателей меняется следующим образом. Для K_{2U} : в 1-м узле – 0,029 (увеличение на 16%); во 2-м – 0,064 (снижение 78%); 3-м – 0,07 (снижение 36%); 4-м – 0,07 (снижение 47%); 5-м – 0,063 (снижение 60%) и в 6-м – 0,042 (снижение – в 2,5 раза). Для K_{OU} : в 1-м узле – 0,04 (снижается в 17 раз); во 2-м – 0,17 (снижается в 2,1 раза); в 3-м – 0,155 (снижение в 3,4 раза); в 4-м – 0,136 (снижается почти в 5 раз); в 5-м – 0,108 (снижение в 7,4 раза) и в 6-м узле – 0,057 (снижение в 15,5 раз). Здесь следует отметить, что в электрических сетях с преимущественно коммунально-бытовой электрической нагрузкой, значение коэффициента K_{2U} не оказывает существенного влияния на работу ЭП, поскольку трёхфазная двигательная нагрузка в указанных электрических сетях минимальна. Повышенное внимание к увеличению этого коэффициента следует уделять в электрических сетях предприятий (промышленного и агропромышленного профиля). Это связано с тем, что обратная последовательность напряжений создает противоположно направленное вращающееся магнитное поле, тормозящее асинхронные электродвигатели, вызывая при этом их дополнительный перегрев и сокращение срока эксплуатационной надежности. Но, поскольку в данной статье рассматривается коммунально-бытовая однофазная нагрузка потребителей, распределенная в трехфазной системе, то определяющее значе-

4-м – 0,103; 5-м – 0,101 и в 6-м – 0,106. Изменение среднего значения K_{OU} по узлам составляет: 1 – 0,678; 2 – 0,36; 3 – 0,525; 4 – 0,678; 5 – 0,809 и 6 – 0,881.

```
*Yee0_1+YDU_1+YE0_1.*(Yee2_1+Yee0_1);
YH11_1 = 3.*Ya1.*Yb1.*Yc1+YD0_1.*
(Yee2_1+Yee0_1)+Yee0_1.*Yee2_1.*YE0_1;
YM1_1 = YH11_1+Yee1_1.*YF11_1;
YK1_1 = Yee0_1.*YE1_1-YD2_1; YL1_1 =
YE2_1.*Yee2_1-YD1_1; YN1_1 = YM1_1-
YH11_1; YQ1_1 = Yee1_1.*YH11_1+YN1_1.
*YP1_1; YR1_1 = YQ1_1+Yx_1.*YN1_1;
K2un1_1 = YK1_1.*Yee1_1.*e./YN1_1;
MK2un1_1 = sqrt((real(K2un1_1)).^2+(imag(K2un1_1)).^2);
K0un1_1 = YL1_1.*Yee1_1.*e./YN1_1;
MK0un1_1 = sqrt((real(K0un1_1)).^2+(imag(K0un1_1)).^2);
K2IL_1 = Y_1.*YK1_1.*Yee1_1./YQ1_1;
MK2IL_1 = sqrt((real(K2IL_1)).^2+(imag(K2IL_1)).^2);
KOIL_1 = Y0_1.*YL1_1.*Yee1_1./YQ1_1;
MKOUX_1 = sqrt((real(KOUX_1)).^2+(imag(KOUX_1)).^2);
save('results.mat','MK2i_1','MK2IL_1','MK0i_1','MKOIL_1',
'MK2ux_1','MK2UX_1','MK0ux_1','MKOUX_1','Kp_1','Kp1_1',
'MK2un_1','MK2un1_1','MK0un_1','MK0un1_1','MYBD1_1',
'AYBD1_1','MYBD2_1','AYBD2_1','MYBD0_1','AYBD0_1');
```

ние в данном случае имеет анализ изменения именно коэффициента K_{OU} . Вследствие этого в дальнейшем будем осуществлять анализ изменения показателей несимметрии напряжений именно по этому показателю.

Рассмотрим, какое влияние оказывает включение СУ на шинах СТ на изменение коэффициента потерь. На рисунке 5 представлены диаграммы изменения этого показателя при отсутствии СУ в сети (рис. 5, а) и при включении СУ на шинах силового трансформатора (рис. 5, б). По оси «X» на этих рисунках отложено изменение мощности несимметричной нагрузки (в отн. ед.), по оси «Y» – изменение тока нулевой последовательности, протекающего по исследуемой линии (в А). Анализ этого рисунка показал следующее. При отсутствии СУ в электрической сети среднее (из десяти значений изменяющейся мощности несимметричной нагрузки) значение коэффициента K_p в рассматриваемых узлах составляли: в 1-м узле – 1,48; во 2-м – 1,35; 3-м – 1,39; 4-м – 1,59; 5-м – 1,9 и в 6-м – 2,1.

Включение СУ на шинах СТ привело к следующему изменению этих значений в узлах: в 1-м – 1,11 (снижение 33%); во 2-м – практически без изменения (снижение 1,5%); 3-м – 1,32 (снижение 5,3%); 4-м – 1,33 (снижение на 20,5%); 5-м – 1,36 (снижение почти на 40%) и в 6-м – 1,26 (снижение 67%).

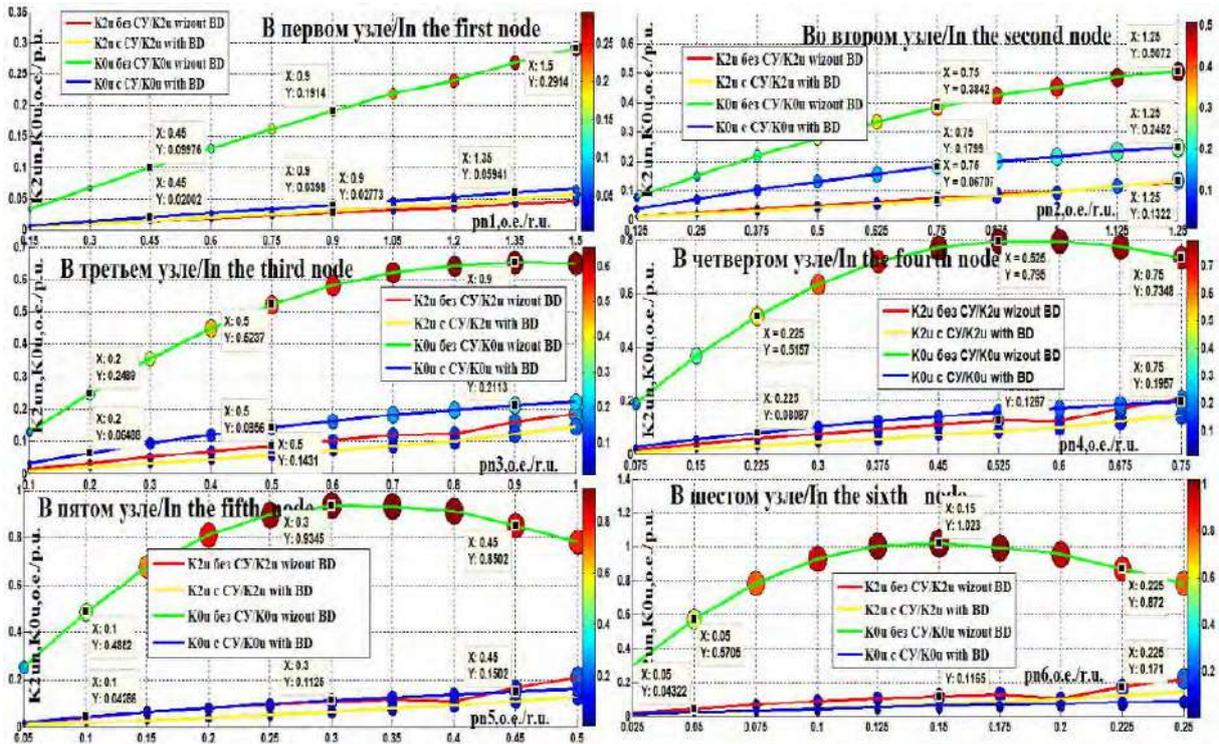


Рис. 4. Нагрузочные диаграммы изменения коэффициентов K_{2u} и K_{0u} в узлах отбора мощности исследуемой модели электрической сети 0,38 кВ (получено автором на основании исследований)

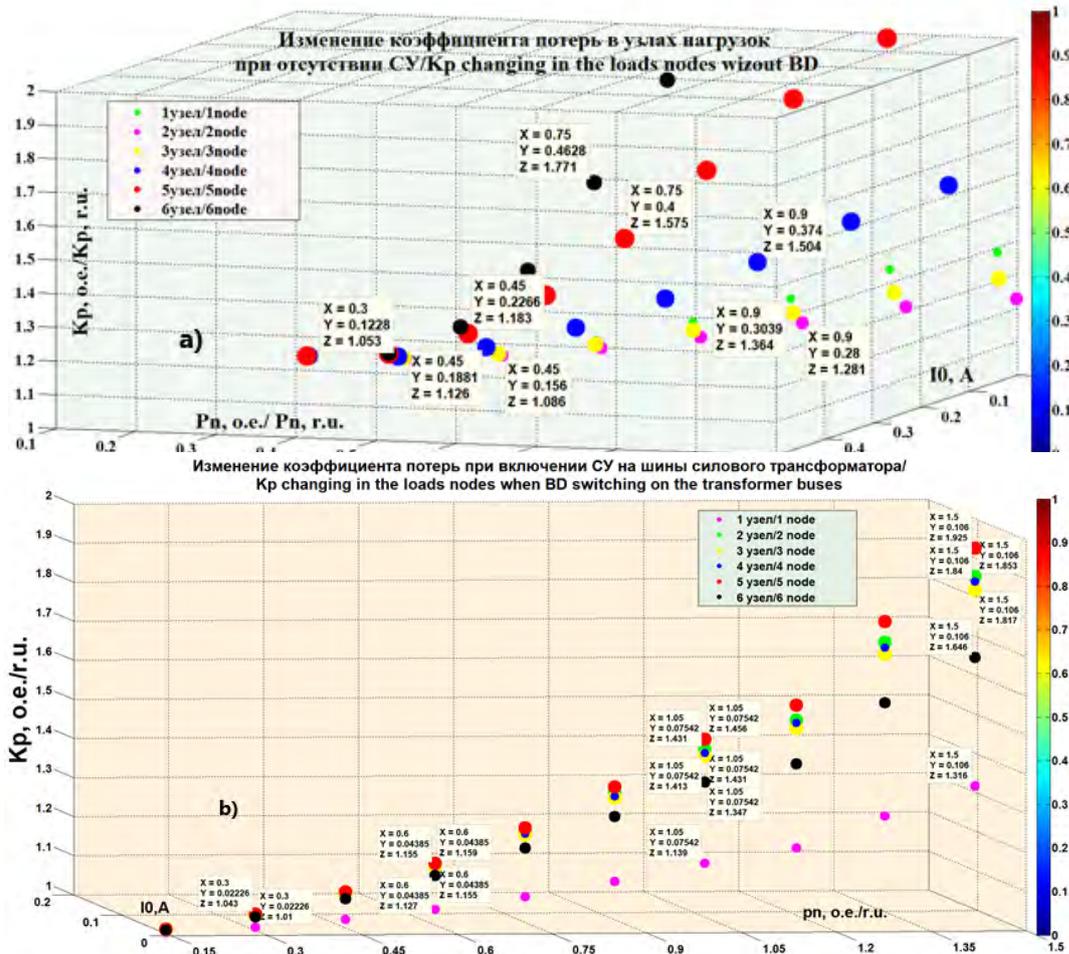


Рис. 5. Изменение коэффициента потерь мощности в узлах электрической сети (получено автором по результатам исследований): а – при отсутствии СУ; б – при включении СУ на шинах СТ

2. СУ включено в первом узле. На рисунке 6 представлены нагрузочные диаграммы изменения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности (рисунк 6, а) и коэффициента потерь (рис. 6 б) соответственно. Анализ изменения коэффициента K_{OU} показал следующее. В 1-м узле его значение составило 0,04, то есть значение показателя равно его значению при включении СУ на шинах. Во 2-м узле – 0,157 (снижение в 2, 3 раза, по сравнению с режимом при отсутствии СУ, а по сравнению с режимом, при котором СУ включено на шинах, составило 8,3%). В 3-м узле значение K_{OU} составило 0,143 (снижение к режиму при отсутствии СУ – в 3,67 раза, когда СУ на шинах – на 8,4%). Для 4-го узла – 0,125 (снижение при отсутствии СУ – в 5,4 раза; при включении СУ на шинах – снижение на 8,8%). В 5-м узле $K_{OU} = 0,099$ (снижение в 8,2 раза – когда сеть без СУ; снижение на 9,1% – когда СУ на шинах). В 6-м узле нагруз-

ки $K_{OU} = 0,053$ (значение снизилось в 16,62 раза, когда сеть без СУ и снижение этого коэффициента составило 9,4% – по сравнению с режимом, когда СУ включено на шинах). Для дальнейшего анализа обозначим режим работы сети при отсутствии СУ режимом 1, а при его включении на шинах СТ – режимом 2.

Для коэффициента K_p (рис. 6 б) произошло следующее изменение. В 1-м узле его значение составило 1,082 (снижение к 1-му режиму – 37%, ко 2-му – 2,8%); во 2-м узле – 1,33 (снижение к 1-му режиму – 2,3%, ко 2-му режиму значения одинаковы); в 3-м узле – 1,32 (снижение, по сравнению с 1-м режимом, – 5,3%; со 2-м режимом значение также совпадает, как и во 2-м узле). Значение коэффициента K_p в 4-м, 5-м и 6-м узлах осталось без изменений – таким же, каким оно было при включении СУ на шины СТ, т.е. в 4-м – 1,327, в 5-м – 1,355 и в 6-м – 1,262.

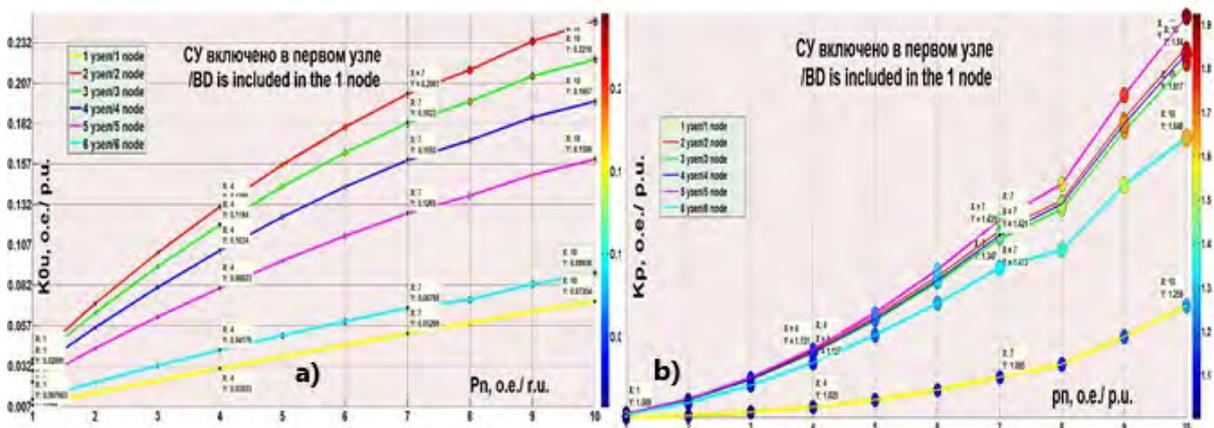


Рис. 6. Изменение исследуемых показателей при включении СУ в 1-м узле нагрузок (получено автором по результатам исследований):
 а – коэффициент несимметрии по нулевой последовательности; б – коэффициент потерь

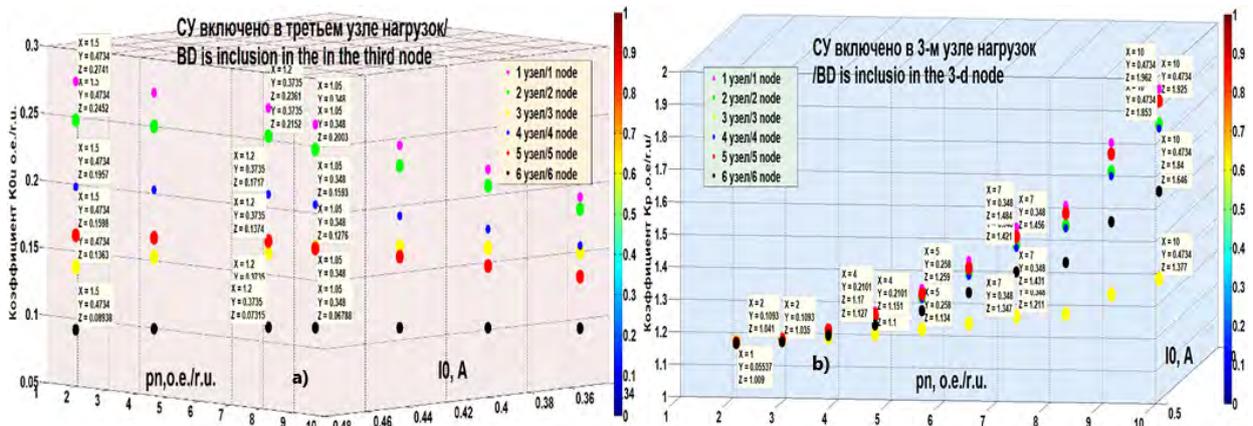


Рис. 7. Изменение исследуемых показателей при включении СУ в 3-м узле нагрузок (получено автором по результатам исследований):
 а – коэффициента K_{OU} , б – коэффициента K_p

Произведенный анализ показал, что включение СУ в 1-м узле нагрузок более эффективно, по сравнению с режимом, когда оно включено на шинах силового трансформатора.

3. СУ включено в третьем узле нагрузок. На рисунке 7 представлены диаграммы изменения коэффициента K_{ou} (рис. 7, а) и коэффициента K_p (рис. 7, б). Предшествующий анализ доказал, что включение СУ в 1-м узле нагрузок является более эффективным, чем на шинах силового трансформатора. В связи с этим будем сравнивать последующие анализируемые режимы именно с режимом, когда СУ в 1-м узле нагрузок.

При подключении СУ в 3-м узле коэффициент K_{ou} в узлах принимал следующие усредненные (в интервале изменения трехфазной несимметричной нагрузки) значения: в 1-м узле – 0,171 (в 4,2 раза больше, чем при включении СУ в 1-м узле); во 2-м – 0,156 (не изменяется); в 3-м – 0,105 (на 36% меньше); в 4-м, 5-м и 6-м

узлах значение этого показателя остается таким же, как и при включении СУ в 1-м узле нагрузок.

Коэффициент K_p изменился только в двух узлах: в 1-м $K_p = 1,37$ (увеличился на 26,9% по сравнению с режимом, когда СУ в 1-м узле) и в 3-м – 1,17 (снижение составило 12,8%). Во всех остальных 4 узлах значение этого показателя осталось таким же, как и при включении СУ в 1-м узле нагрузок.

Проведенный анализ показывает, что расположение СУ в центральной части линии электропередачи, вдоль которой производится ступенчатый, несимметричный отбор мощности, не приносит большей эффективности, чем расположение этого устройства в первом узле нагрузок (ближайшем, к шинам источника питания).

4. СУ включено в шестом узле нагрузок. На рисунке 8 представлены нагрузочные диаграммы изменения исследуемых показателей при включении СУ в последнем, 6-м, узле нагрузок.

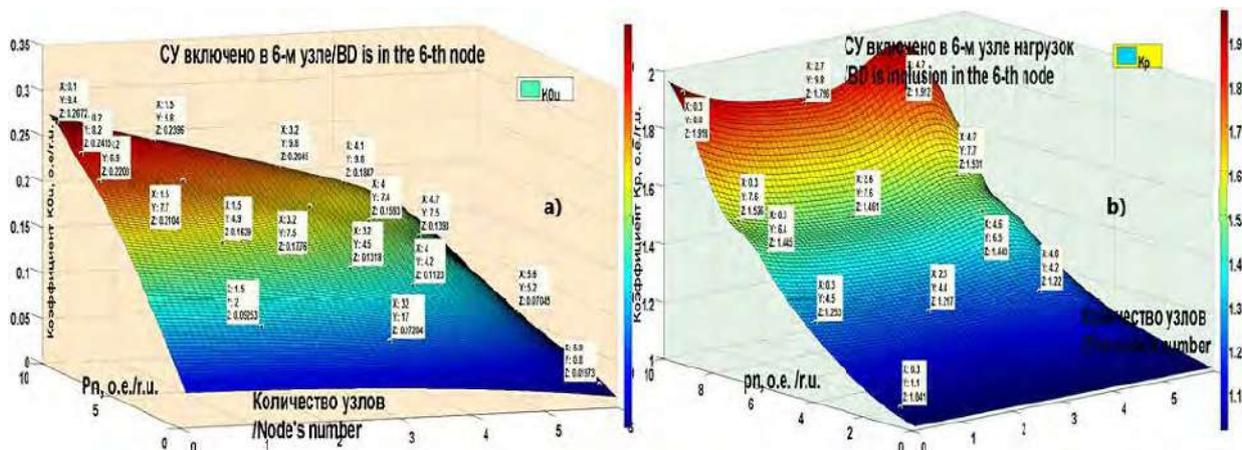


Рис. 8. Изменение исследуемых показателей при включении СУ в 6-м узле нагрузок (получено автором по результатам исследований):

- а – коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности;**
- б – коэффициента потерь мощности**

Рассмотрим, насколько изменяются исследуемые показатели, обусловленные несимметричным электропотреблением при включении СУ в конечном, 6 узле, отбора мощности. Изменение значений показателей также будем сравнивать с их значениями, в режиме работы сети, когда СУ включено в 1-м узле нагрузки. Как показывает анализ рисунка 8, а, значение коэффициента K_{ou} в рассматриваемых узлах изменяется только в 2 случаях: в 1-м узле его значение, равное 0,171, превышает более чем в 4 раза свое значение, по сравнению с режимом, когда СУ

включено в 1-м узле; в последнем, 6-м узле, значение этого коэффициента, равное 0,038, снижается на 39,5%, по сравнению с указанным режимом.

Коэффициент K_p (рис. 8, б) точно также, как и K_{ou} изменяется только в двух узлах: в 1-м его значение увеличивается на 27%, а в 6-м – снижается на 10,5%, по сравнению с контрольным режимом, когда СУ – в 1-м узле. Таким образом, включение СУ в последнем из узлов отбора мощности не оказывает существенного результата для достижения поставленной цели.

Подводя итог произведенному анализу смоделированных ситуаций несимметричного электропотребления, можно сделать следующие выводы.

Заключение

1. Моделирование измененных режимов работы электрических сетей позволяет оценивать возможность интегрирования в этих электрических специальных технических средств, симметрирующих несимметричные потоки, создаваемые трехфазной несимметричной нагрузкой в различных точках их подключения.

2. Наиболее эффективным инструментом для достижения целей разработанных алгоритмов моделируемых ситуаций является высокоуровневая среда программирования MATLAB, позволяющая учитывать множество изменений в исследуемой электрической сети при изменении ее параметров.

3. Анализ способов и технических средств минимизации несимметричных потоков с целью повышения качества и снижения дополнительных потерь ЭЭ показал, что наиболее эффективным средством достижения такого результата является использование специальных СУ с минимально-возможным сопротивлением токам нулевой последовательности с саморегулируемой индуктивностью.

4. Наиболее эффективным местом интеграции в электрической сети специальных технических средств симметрирования для снижения дополнительных потерь и повышения качества электрической энергии является ближайший к шинам источника питания узел несимметричного отбора мощности.

Библиографический список

1. Козловская, В. Б. Несимметричные режимы работы линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц. – Текст: непосредственный // Энергетика: известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – № 62 (3). – С. 232-246.

2. Жилин, М. И. Повышение качества электрической энергии / М. И. Жилин, О. В. Воркунов. – Текст: непосредственный // Приоритетные направления развития науки: сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции: в 2 частях. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Научное партнерство «Апекс», 2017. – С. 83-85.

3. Дулепов, Д. Е. Снижение потерь и повышение качества электроэнергии в асимметричных режимах в сельских распределительных электрических сетях / Д. Е. Дулепов, Т. Е. Кондраненкова. – Текст: непосредственный // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции. – Самара: Самарский государственный технический университет. – С. 328-331.

4. Фетисов, Л. В. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения / Л. В. Фетисов, Н. В. Роженова, О. А. Булатов. – Текст: непосредственный // Проблемы энергетики: известия высших учебных заведений. – 2018. – Т. 20, № 11-12. – С. 99-106. – DOI 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106.

5. Наумов, И. В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметричных устройств: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Наумов Игорь Владимирович. – Санкт-Петербург, 2002. – 387 с. – Текст: непосредственный.

6. Li, R., Wong, P., Wang, K., et al. (2020). Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia. *Protection and Control of Modern Power Systems*. 5. DOI: 10.1186/s41601-020-00163-x.

7. Basmanov, V., Votinsev, A. (2021). Developing a Methodology for Calculating Asymmetric Modes of Power Supply Systems at Enterprises if Source Information is Incomplete. 191-196. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446400.

8. Волков, С. В. Качество электрической энергии в низковольтных электрических сетях с коммунально-бытовой нагрузкой / С. В. Волков, А. И. Орлов, Д. В. Бортник; ответственный редактор О. Е. Железникова. – Текст: непосредственный // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: сборник материалов XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием в рамках IV Всероссийского светотехнического форума с международным участием. – Саранск, 2017. – С. 517-525.

9. Naumov, I.V. (2018). Additional Power Losses in Low-Voltage Electrical Networks and Their Influence on People. 844-853. DOI: 10.15405/epsbs.2018.12.103.

10. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. – Москва: Энергия, 1975. – 752 с.: ил. – Текст: непосредственный.
11. Косоухов, Ф. Д. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. О. Филиппов. – Текст: непосредственный // *Электротехника*. – 2014. – № 6. – С. 8-12.
12. Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников. – URL: <https://www.ruself.ru/information/vliyanie-kachestva-elektroenergii-na-rabotu-elektroprivodov/> (дата обращения: 02.04.2022). – Текст: электронный.
13. Распопов, Е. В. Электрические сети и системы. Качество электроэнергии и его обеспечение / Е. В. Распопов. – URL: <https://forca.ru/knigi/arhiv/kachestvo-elektroenergii-i-ego-obespechenie-2.html> (дата обращения: 02.04.2022). – Текст: электронный.
14. Волков, Н. Г. Качество электроэнергии в системах электроснабжения: учебное пособие / Н. Г. Волков. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2010. – 152 с. – Текст: непосредственный.
15. Наумов, И. В. Управление качеством электрической энергии: учебное пособие / И. В. Наумов. – Благовещенск: Изд-во Амурского ГУ, 2014. – 110 с. – Текст: непосредственный.
16. Sevostyanov, A., Vagin, G. (2020). The impact of electrical power quality indicators on the accuracy of industrial power supply system management. *E3S Web of Conferences*. 216. 01068. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601068.
17. Karimov, R. (2020). Study of the state of the issue of increasing the quality of electric energy in the power supply systems. *E3S Web of Conf*. 216 01163. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601163.
18. Naumov, I., Karamov, D., Tretyakov, A., Fedorinova, E., Yakupova, M. (2020). Additional electric loss in rural distribution networks 0.38 kV. *E3S Web of Conferences*. 209. 07007. DOI: 10.1051/e3sconf/202020907007.
19. Naumov, I. V. (2019). An Analysis of Fires Due to Violation of the Rules for Design and Operation of Electrical Plants, and How to Prevent them in Residential Buildings (on the Example of the Amur Region), *2019 International Science and Technology Conference "EastConf"*. 1-5. DOI: 10.1109/EastConf.2019.8725407.
20. Наумов, И. В. К вопросу о возникновении пожароопасных ситуаций при несимметричном электропотреблении / И. В. Наумов, Д. Н. Карамов. – Текст: непосредственный // *Надежность и безопасность энергетики*. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 69-76.
21. Бурбело, М. И. Управление симметрирующими устройствами при многократной несимметрии нагрузок в распределительной электрической сети / М. И. Бурбело, М. В. Девятко, Ю. П. Войтюк. – Текст: непосредственный // *Научные труды Винницкого национального технического университета*, 2012. – № 2. – С. 2.
22. Pana, A., Baloi, A., Molnar-Matei, F. (2007). Experimental Validation of Power Mechanism for Load Balancing Using Variable Susceptances in Three Phase Four Wire Distribution Networks. *EUROCON 2007 - The International Conference on "Computer as a Tool"*. 1567-1572. DOI: 10.1109/EURCON.2007.4400415.
23. Shklyarskiy, Y. E., Shklyarskiy, A. Y., Belitskiy, A. A. (2017). The compensation criterion of overload neutral wire current in low voltage electrical networks. 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 1012-1015. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910728.
24. Наумов, И. В. Методы и технические средства снижения асимметрии токов и потерь электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Наумов Игорь Владимирович. – Ленинград, 1989. – 277 с. – Текст: непосредственный.
25. Трансформаторы типа ТМГСУ и ТМГСУ11 со специальным встроенным симметрирующим устройством / МЭТЗ им. В. И. Козлова. – URL: <https://metz.by/library/transformatory-tipa-tmgsu-i-tmgsu11-so-specialnym-vstroennym-simmetriruyushhim-ustrojstvom/> (дата обращения: 02.04.2022). – Текст: электронный.
26. ТСТ2Р (ТСТР) – трехфазный симметрирующий трансформатор -нормализатор напряжения. – URL: <https://et-spb.ru/transformatory-simmetriruyushhie/tst2r/> (дата обращения: 02.04.2022). – Текст: электронный.
27. Патент № 26699 U1 Российская Федерация, МПК H02J 3/26 (2000.01). Устройство для симметрирования токов и напряжений в трехфазной сети с нулевым проводом и саморегули-

руемой индуктивностью: № 2002114471/20: заявл. 03.06.2002: опублик. 10.12.2002 / Наумов И. В., Лукина Г. В., Лукин А. А. [и др.]. – 7 с. – Текст: непосредственный.

28. Патент № 2490768 С2 Российская Федерация, МПК H02J 3/26 (2006.01). Симметрирующее устройство для трехфазных сетей с нулевым проводом: № 2010144245/07Д: заявл. 28.10.2010: опублик. 20.08.2013 / Наумов И. В., Иванов Д. А., Подъячих С. В., Гантулга Д. – 7 с. – Текст: непосредственный.

29. Патент № 61063 U1 Российская Федерация, МПК H02J 3/26 (2006.01). Симметрирующее устройство для трехфазной четырехпроводной сети с регулируемыми параметрами: № 2006110751/22: заявл. 2006.04.03: опублик. 2007.02.10 / Иванов Д. А., Наумов И. В., Шпак Д. А. [и др.]. – 7 с. – Текст: непосредственный.

30. Куликовский, А. А. Система городских распределительных сетей низкого напряжения с искусственными нейтральными точками / А. А. Куликовский. – Текст: непосредственный // Электричество. – 1947. – № 9. – С. 45.

31. СТО 34.01-21.1-001-2017. Распределительные электрические сети напряжением 0,4-110 кВ. Требования к технологическому проектированию. – URL: https://standartgost.ru/g/%D0%A1%D0%A2%D0%9E_34.01-21.1-001-2017 (дата обращения: 03.04.2022). – Текст: электронный.

References

1. Kozlovskaja, V. B. Nesimmetrichnye rezhimy raboty linii naruzhnogo osveshcheniia / V. B. Kozlovskaja, V. N. Kalechits // Energetika. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh obiedinenii SNG. – 2019. – No. 62 (3). – S. 232-246.

2. Zhilin, M. I. Povyshenie kachestva elektricheskoi energii / M. I. Zhilin, O. V. Vorkunov // Prioritetnye napravleniia razvitiia nauki: sbornik statei po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 2 ch. – Moskva: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennostiu "Nauchnoe partnerstvo "Apeks", 2017. – S. 83-85.

3. Dulepov, D. E. Snizhenie poter i povyshenie kachestva elektroenergii v asimmetrichnykh rezhimakh v selskikh raspredelitelnykh elektricheskikh setiakh / D. E. Dulepov, T. E. Kondranenkova // Elektroenergetika glazami molodezhi: materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi

konferentsii. – Samara: Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. – S. 328-331.

4. Fetisov, L. V. Povyshenie kachestva elektricheskoi energii v setiakh nizkogo napriazheniia / L. V. Fetisov, N. V. Rozhentsova, O. A. Bulatov // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. – 2018. – T. 20. – No. 11-12. – S. 99-106. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106.

5. Naumov, I. V. Snizhenie poter i povyshenie kachestva elektricheskoi energii v selskikh raspredelitelnykh setiakh 0,38 kV s pomoshchiu simmetrichnykh ustroystv: dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / I. V. Naumov. – Sankt-Peterburg, 2002. – 387 s.

6. Li, R., Wong, P., Wang, K., et al. (2020). Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia. *Protection and Control of Modern Power Systems*. 5. DOI: 10.1186/s41601-020-00163-x.

7. Basmanov, V., Votinsev, A. (2021). Developing a Methodology for Calculating Asymmetric Modes of Power Supply Systems at Enterprises if Source Information is Incomplete. 191-196. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446400.

8. Volkov, S. V. Kachestvo elektricheskoi energii v nizkovoltnykh elektricheskikh setiakh s kommunalno-bytovoi nagruzkoi / S. V. Volkov, A. I. Orlov, D. V. Bortnik; otv. red. O. E. Zheleznikova // Problemy i perspektivy razvitiia otechestvennoi svetotekhniki, elektrotekhniki i energetiki: sbornik materialov XIII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem v ramkakh IV Vserossiiskogo svetotekhnicheskogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem. – Saransk, 2017. – S. 517-525.

9. Naumov, I.V. (2018). Additional Power Losses in Low-Voltage Electrical Networks and Their Influence on People. 844-853. DOI: 10.15405/epsbs.2018.12.103.

10. Osnovy teorii tsepei / G. V. Zeveke, P. A. Ionkin, A. V. Netushil, S. V. Strakhov: uchebnyk dlia vuzov. – 4-e izd., pererab. – Moskva: Energiia, 1975. – 752 s.: il.

11. Kosoukhov, F. D. Snizhenie poter ot nesimmetrii tokov i povyshenie kachestva elektricheskoi energii v setiakh 0,38 kV s kommunalno-bytovymi nagruzkami / F. D. Kosoukhov, N. V. Vasilev, A. O. Filippov // Elektrotekhnika. – 2014. – No. 6. – S. 8-12.

12. Vliianie kachestva elektroenergii na rabotu elektropriemnikov. – URL: <https://www.ruselt.ru/information/vliyanie-kachestva-elektroenergii-na-rabotu-elektropriemnikov/> (data obrashcheniia: 02.04.2022).
13. Raspopov, E. V. Elektricheskie seti i sistemy. Kachestvo elektroenergii i ego obespechenie / E. V. Raspopov. – URL: <https://forca.ru/knigi/arhiv/kachestvo-elektroenergii-i-ego-obespechenie-2.html> (data obrashcheniia: 02.04.2022).
14. Volkov, N. G. Kachestvo elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniia: uchebnoe posobie / N.G. Volkov. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010. – 152 s.
15. Naumov, I. V. Upravlenie kachestvom elektricheskoi energii: uchebnoe posobie / I. V. Naumov. – Blagoveshchensk: Izd-vo Amurskogo GU, 2014. – 110 s.
16. Sevostyanov, A., Vagin, G. (2020). The impact of electrical power quality indicators on the accuracy of industrial power supply system management. *E3S Web of Conferences*. 216. 01068. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601068.
17. Karimov, R. (2020). Study of the state of the issue of increasing the quality of electric energy in the power supply systems. *E3S Web of Conf*. 216 01163. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601163.
18. Naumov, I., Karamov, D., Tretyakov, A., Fedorinova, E., Yakupova, M. (2020). Additional electric loss in rural distribution networks 0.38 kV. *E3S Web of Conferences*. 209. 07007. DOI: 10.1051/e3sconf/202020907007.
19. Naumov, I. V. (2019). An Analysis of Fires Due to Violation of the Rules for Design and Operation of Electrical Plants, and How to Prevent them in Residential Buildings (on the Example of the Amur Region), *2019 International Science and Technology Conference "EastConf"*. 1-5. DOI: 10.1109/EastConf.2019.8725407.
20. Naumov, I. V. K voprosu o vozniknovenii pozharoopasnykh situatsii pri nesimmetrichnom elektropotreblenii / I. V. Naumov, D. N. Karamov // *Nadezhnost i bezopasnost energetiki*. – 2021. – T. 14. – No. 1. – S. 69-76.
21. Burbelo, M. I. Upravlenie simmetriuiushchimi ustroistvami pri mnogokratnoi nesimmetrii nagruzok v raspredelitelnoi elektricheskoi seti / M. I. Burbelo, M. V. Deviatko, lu. P. Voitiuk // *Nauchnye trudy Vinnitskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta*. – 2012. – No. 2. – S. 2.
22. Pana, A., Baloi, A., Molnar-Matei, F. (2007). Experimental Validation of Power Mechanism for Load Balancing Using Variable Susceptances in Three Phase Four Wire Distribution Networks. *EUROCON 2007 - The International Conference on "Computer as a Tool"*. 1567-1572. DOI: 10.1109/EURCON.2007.4400415.
23. Shklyarskiy, Y. E., Shklyarskiy, A. Y., Belitskiy, A. A. (2017). The compensation criterion of overload neutral wire current in low voltage electrical networks. 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EConRus). 1012-1015. DOI: 10.1109/EConRus.2017.7910728.
24. Naumov, I. V. Metody i tekhnicheskie sredstva snizheniia asimmetrii tokov i poter elektricheskoi energii v selskikh raspredelitelnykh setiakh 0,38 kV: dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / I. V. Naumov. – Leningrad, 1989. – 277 s.
25. Transformatory tipa TMGSU i TMGSU11 so spetsialnym vstroennym simmetriuiushchim ustroistvom / METZ im. V.I. Kozlova. – URL: <https://metz.by/library/transformatory-tipa-tmgsu-i-tmgsu11-so-specialnym-vstroennym-simmetriuiushchim-ustrojstvom/> (data obrashcheniia: 02.04.2022).
26. TST2R (TSTR) – trekhfaznyi simmetriuiushchii transformator-normalizator napriazheniia. – URL: <https://et-spb.ru/transformatory-simmetriuiushchie/tst2r/> (data obrashcheniia: 02.04.2022).
27. Patent No. 26699 U1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK H02J 3/26 (2000.01). Ustroistvo dlia simmetrirovaniia tokov i napriazhenii v trekhfaznoi seti s nulevym provodom i samoreguliruemoi induktivnostiu: No. 2002114471/20: zaiavl. 03.06.2002: opubl. 10.12.2002 / Naumov I. V., Lukina G. V., Lukin A. A., Sukiasov S. V., Podieiachikh S. V. – 7 s.
28. Patent No. 2490768 S2 Rossiiskaia Federatsiia, MPK H02J 3/26 (2006.01). Simmetriuiushchee ustroistvo dlia trekhfaznykh setei s nulevym provodom: No. 2010144245/07D: zaiavl. 28.10.2010: opubl. 20.08.2013 / Naumov I. V., Ivanov D. A., Podieiachikh S. V., Gantulga D. – 7 s.
29. Patent No. 61063 U1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK H02J 3/26 (2006.01). Simmetriuiushchee ustroistvo dlia trekhfaznoi chetyrekhprovodnoi seti s reguliruemyimi parametrami: No. 2006110751/22: zaiavl. 2006.04.03: opubl. 2007.02.10 / Ivanov D. A., Naumov I. V.,

Shpak D. A., Matveenko A. A., Podieiachikh S. V., Sukiasov S. V. – 7 s.

30. Kulikovskii, A. A. Sistema gorodskikh raspredelitelnykh setei nizkogo napriazheniia s iskusstvennymi neitralnymi tochkami // Elektrichestvo. – 1947. – No. 9. – S. 45.

31. STO 34.01-21.1-001-2017. Raspredelitelnye elektricheskie seti napriazheniem 0,4-110 kV. Trebovaniia k tekhnologicheskomu proektirovaniuu. – URL: https://standartgost.ru/g/%D0%A1%D0%A2%D0%9E_34.01-21.1-001-2017 (data obrashcheniia: 03.04.2022).



УДК 621.311

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-212-6-104-108

Е.В. Титов, А.Г. Казакеев, С.Г. Казакеев
E.V. Titov, A.G. Kazakeev, S.G. Kazakeev

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ВЛАЖНОСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

PRELIMINARILY EVALUATION OF MAGNETIC FIELD BEHAVIOR UNDER HUMIDITY INFLUENCE

Ключевые слова: магнитная составляющая электромагнитного поля, влажность воздуха, электромагнитная обстановка, контроль магнитного поля, экспериментальная установка, измерители магнитной составляющей, предварительная оценка, влажностное воздействие, характер изменения магнитного поля.

Рассматриваются вопросы оценки поведения постоянного и переменных составляющих магнитного поля в ограниченном частотном диапазоне при изменении влажности воздуха, что является крайне важным для контроля и оценки электромагнитной обстановки внутри и вне помещений. Проведен предварительный эксперимент по выявлению общих закономерностей влияния влажности на постоянное и переменное магнитные поля на частотах 50 Гц, 30 кГц, 3 МГц, 30 МГц и 50 МГц. Влажность воздуха изменялась с использованием микрораспылителя. Контроль влажности проводился с помощью разработанного автоматизированного датчика. Поведение магнитной составляющей электромагнитного поля в диапазоне до 50 МГц оценивалось с помощью измерителя постоянного магнитного поля (МТМ-01), измерителя параметров электрического и магнитного полей в частотном диапазоне 5 Гц-400 кГц (BE-meter-AT-004) и измерителя уровня электромагнитных излучений ПЗ-41, позволяющего проводить контроль в диапазоне от 10 кГц до 40 ГГц. Представлены графики изменения напряженности постоянного и пе-

ременных магнитных полей исследуемых частотных составляющих с учетом влияния влажности воздуха.

Keywords: electromagnetic field magnetic component, air humidity, electromagnetic environment, magnetic field measurement, experimental installation, magnetic component meters, preliminary evaluation, humidity effect, magnetic field behavior.

This paper discusses the issues of evaluating the behavior of the constant and variable components of the magnetic field in a limited frequency range with changes of air humidity. This is very important for monitoring and evaluating the electromagnetic environment inside and outside the premises. A preliminary experiment was carried out to identify general patterns of humidity influence on permanent and alternating magnetic fields at frequencies of 50 Hz, 30 kHz, 3 MHz, 30 MHz and 50 MHz. The air humidity was changed by using a micro-sprayer. The humidity was measured by using a developed automated sensor. The behavior of the magnetic component of the electromagnetic field in the range up to 50 MHz was evaluated using a constant magnetic field meter (MTM-01), a meter of electric and magnetic field parameters in the frequency range of 5 Hz - 400 kHz (BE-meter-AT-004) and a meter of electromagnetic radiation level P3-41 which allowed monitoring in the range from 10 kHz to 40 GHz. The graphs of changes in the intensity of the constant and variable magnetic fields of the studied frequency components are presented taking into account the influence of air humidity.

Титов Евгений Владимирович, д.т.н., доцент, вед. науч. сотр., ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: 888tev888@mail.ru.

Titov Evgeniy Vladimirovich, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Leading Researcher, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: 888tev888@mail.ru.