

*Электроснабжение,
электротравматизм,
распределительные
сети, симметричное
распределение нагрузки,
трехфазные сети*

*Power supply, electric
injuries, distribution
network, symmetric
distribution of the load,
three phase networks*

ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В АПК

П.С. Орлов (фото)

д.т.н., доцент, заведующий кафедрой электрификации
В.В. Морозов

к.ф.-м.н., проректор по научной работе
и международным связям

ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА

С.П. Кочкин

заведующий кафедрой электрических распределительных
сетей ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА, заместитель главного
инженера по эксплуатации – начальник управления
высоковольтных сетей филиала ПАО «МРСК Центра» –
«Ярэнерго»

В 2016 г. в Российской Федерации зарегистрировано 64 несчастных случая со смертельным исходом на энергоустановках, подведомственных Ростехнадзору (в 2015 г. – 54 случая с летальным исходом, в 2014 г. – 66, в 2013 г. – 102, в 2012 г. – 125). 27 несчастных случаев произошло в электрических сетях (42% всех летальных случаев), 36 человек погибло в электроустановках потребителей (56% летальных случаев), 1 человек погиб при эксплуатации тепловых установок энергоснабжающих организаций. Наибольшее число несчастных случаев произошло в ходе выполнения работ на воздушных линиях электропередач, на электропроводах без снятия напряжения и в распределительных устройствах вследствие случайного прикосновения к токоведущим частям, находящимся под напряжением [1].

Для потребителей на первом месте (с точки зрения качества потребляемой электрической энергии) стоит проблема падения напряжения ниже допустимых значений, на втором месте – перекос фаз и появление высших гармоник в сети под влиянием электроприемников потребителей – люминесцентных ламп, силового частотного электропривода и нагрузки от компьютерной техники. Следует отметить, что сам потребитель ощущает в первую очередь отключения электроэнергии и только затем падение напряжения и скачки напряжения в сети. Потребитель фиксирует эти проблемы только визуально – низкое напряжение в сети приводит к снижению производительности электроприемников: лампы освещения тускнеют, вода в чайнике закипает медленнее, компрессоры холодильников могут не запускаться [2].

В сетях напряжением 6–20 кВ происходит в среднем до 30 отключений в год в расчете на 100 км линий; в сетях напряжением 0,4 кВ – до 100 отключений, что в общей сложности приводит к 5–6 отключениям потребителей [3].

А между тем в сельскохозяйственном производстве перерывы в электроснабжении ведут к недополучению продукции, стрессу животных и птицы, выбраковке и гибели животных и урожая культур.

Большинство несчастных случаев происходит в электроустановках потребителей при попытках потребителей самостоятельного восстановления электроснабжения при устранении неисправностей в электропроводах: из-за «отгорания» нулевого провода при понижении напряжения фазы или при его исчезновении.

Ток в нулевом проводе вызывает падение напряжения ΔU_N и смещение нейтрали, что приводит при несимметричной нагрузке к потерям фазного напряжения ΔU_Φ на участках сети:

$$\Delta U_\Phi = I_\Phi (R_\Phi \cos \varphi + X_\Phi \sin \varphi),$$

где R_Φ и X_Φ – активное и индуктивное сопротивление участка (фазы или трансформатора), по которому течет ток нагрузки.

Суммируя падения напряжений на участках линии электропередачи $\Delta U_{\Phi ЛЭП i}$ и на трансформаторе $\Delta U_{\Phi ТР i}$, находим падение фазного напряжения от источника до потребителя $\Delta U_{\Phi \Sigma}$:

$$\Delta U_{\Phi \Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta U_{\Phi i} = \sum_{i=1}^n \Delta U_{\Phi ЛЭП i} + \sum_{i=1}^n \Delta U_{\Phi ТР i}.$$

Фазное напряжение у потребителя (электроприемника) меньше напряжения источника $U_{\text{фист}}$ на $\Delta U_{\Phi \Sigma}$ и на падение напряжения ΔU_N в нулевом проводе:

$$U_{\text{ФЭПР}} = U_{\text{фист}} - \Delta U_{\Phi \Sigma} - \Delta U_N.$$

Несимметричная нагрузка ведет к тому, что в фазных проводах текут разные токи; появляется ток в нулевом проводе, сказываясь на потерях мощности и энергии в линии, которые в 2–6 раз превышают потери электрической энергии по сравнению с сетями, работающими в симметричных режимах [4, 5].

Равномерное распределение нагрузки по фазам снижает электрические потери в сети в 6 раз по сравнению с однофазной нагрузкой трехфазной сети [6].

Неравномерная нагрузка сказывается не только на работе линии, но и на работе электроприемников: у асинхронных электродвигателей при питании их несимметричными напряжениями появляются симметричные составляющие токов обратной последовательности, магнитный поток статоров становится эллипсным, и электрические машины генерируют обратный вращающий момент, снижающий крутящий момент на валу машины, вызывающий повышенный ток статора и перегрев ротора электродвигателя; у ламп накаливания при питании повышенным напряжением резко снижается срок службы; питание пониженным напряжением существенно снижа-

ет световой поток. У трансформаторов несимметричная нагрузка вызывает перегрузку отдельных обмоток, повышение фазных напряжений и насыщение магнитопровода. Работу трансформаторов в несимметричных режимах объясняют с помощью симметричных составляющих, в которых векторы токов прямой последовательности достигают максимумов последовательно в фазах А, В и С, одинаковых по модулю. Векторы токов обратной последовательности также равны по модулю и достигают максимумов последовательно в фазах А, С и В. Система токов нулевой последовательности во всех трех фазах имеет одно направление (нулевой сдвиг по фазе) и равно по модулю. Появление токов и магнитных потоков нулевой последовательности аналогично появлению токов и магнитных потоков третьей гармоники, но они имеют разную природу возникновения. Токи и магнитные потоки нулевой последовательности появляются вследствие несимметрии нагрузки, а потоки и токи третьей гармоники возникают из-за несимметрии магнитной системы и нелинейной магнитной характеристики стали магнитопровода. Кроме того, токи и магнитные потоки нулевой последовательности изменяются с частотой сети, а токи (и магнитные потоки) третьей гармоники – с утроенной частотой. Большая часть магнитных потоков нулевой последовательности охватывают первичную и вторичную обмотки и являются потоками взаимной индукции, индуцирующих в обмотках ЭДС нулевой последовательности, но в случае отсутствия нулевого провода в трехстержневом трансформаторе токи нулевой последовательности в обмотках отсутствуют, так как в этом случае обмотки трансформатора для них разомкнуты [7, 8].

В отличие от вращающихся роторов электрических двигателей в трансформаторах сопротивления прямой последовательности равны сопротивлениям обратной последовательности: если у трансформатора, работающего с симметричной нагрузкой, изменить порядок чередования фаз (поменять местами два провода из трех, которые подводят к первичной обмотке напряжение сети), то изменится на обратное и чередование токов фаз трансформатора, но внутреннее сопротивление трансформатора не изменится. Следовательно, токи обратной последовательности трансформируются из вторичной обмотки в первичную, как и токи прямой последовательности, и имеют одни и те же схемы замещения [6].

Сопротивление нулевой последовательности отличается от сопротивлений прямой и

обратной последовательностей по значению и по характеру, поскольку токи нулевой последовательности во всех трех фазах равны по модулю, не имеют сдвига по фазе и сумма их не равна нулю. Сопротивление нулевой последовательности и схема замещения для токов нулевой последовательности зависит как от схемы соединения обмоток, так и от конструкции магнитной системы трансформатора. При разложении несимметричной системы линейных токов вторичной обмотки трансформатора на симметричные составляющие нулевая последовательность может отсутствовать: токи нулевой последовательности могут существовать только в том случае, когда для них имеется контур, по которому они могут замкнуться, который существует только тогда, когда обмотка соединена по схеме звезда с нулевым проводом. В этом случае токи нулевой последовательности фаз замыкаются через нулевой провод, а ток в нулевом проводе равен утроенному значению тока нулевой последовательности. Токи нулевой последовательности вторичной обмотки трансформатора не уравновешены соответствующими токами первичной обмотки и не трансформируются в первичную обмотку трансформатора Y/YN (для них цепь первичной обмотки разомкнута – для токов нулевой последовательности все фазы первичной обмотки параллельны). Поэтому токи нулевой последовательности, протекая только по вторичным обмоткам, являются намагничивающими и создают в стержнях магнитопровода магнитные потоки нулевой последовательности, равные по модулю и параллельно направленные в одну сторону. Поэтому магнитные потоки нулевой последовательности, возникшие в каждом из стержней магнитопровода трансформатора, не могут замкнуться через своих соседей, так как эти магнитные потоки имеют одинаковое направление в каждом из стержней. В результате магнитный поток нулевой последовательности замкнется от ярма к ярму через окружающее обмотки пространство. В трехстержневых трансформаторах потоки нулевой последовательности относительно малы, так как замыкаются от ярма к ярму через среду с огромным магнитным сопротивлением – воздух и трансформаторное масло, металлический крепеж и стенки кожуха или бака трансформатора. Замыкание магнитных потоков через металлические детали приводит к появлению вихревых токов, разогревающих масло, обмотки и бак трансформатора. Перегрев сокращает срок службы изоляции. Растет температура масла, не позволяя

нагрузить трансформатор даже до номинальной нагрузки, падает КПД трансформатора. Магнитные потоки нулевой последовательности индуцируют в обмотках ЭДС, смещающие нейтраль фазных напряжений и увеличивая несимметрию нагрузки [8].

Трехфазные асинхронные машины проектируют для работы с коэффициентом обратной последовательности $K_{2U} \leq 2\%$. В сельскохозяйственных и в промышленных сетях с двухфазной нагрузкой этот норматив часто нарушается. При работе электродвигателя на номинальном вращающем моменте и $K_{2U} = 4\%$ срок службы изоляции снижается в 2 раза. Следует учесть, что при несимметрии напряжений одно или два фазных напряжения могут превышать номинальное значение, тогда срок службы изоляции электрооборудования сокращается еще больше. Так как нулевая точка электродвигателя не соединяется с нулевой точкой источника, то токи нулевой последовательности не протекают через статорные обмотки, и система токов, протекающих в статорных обмотках при несимметрии питающих напряжений, может быть разложена только на токи прямой и обратной последовательностей.

Скольжение для тока прямой последовательности:

$$s_1 = s_{\text{НОМ}} = (n_1 - n_2) / n_1. \quad (1)$$

Скольжение для тока обратной последовательности:

$$s_2 = [n_1 - (-n_2)] / n_1 = (n_1 + n_2) / n_1. \quad (2)$$

Подставим в формулу (2) значение $n_2 : n_2 = n_1 - n_1 s_{\text{НОМ}}$

$$\begin{aligned} s_2 &= [n_1 - (-n_2)] / n_1 = (n_1 + n_2) / n_1 = \\ &= [n_1 + n_1(1 - s_{\text{НОМ}})] / n_1 = 2 - s_{\text{НОМ}} \end{aligned}$$

частота тока обратной последовательности в роторе почти в 2 раза выше, чем для симметричных составляющих прямой последовательности, что приводит к перегреву ротора, температура которого на 35...40° выше температуры статора. Тепловое расширение стержней ротора приводит к повреждению роторной обмотки машины, снижает мощность электродвигателя и вызывает периодические колебания потребляемых токов (в асинхронных машинах снижение вращающего момента незначительно – только до $K_{2U} \leq 4\%$). Значительная (более 5%) несимметрия приводит к вибрации электродвигателя в результате появления знакопеременных вращающих моментов и сил, пульсирующих с двойной частотой. Вместе

с тем, электродвигатель, работающий под нагрузкой или вхолостую, уменьшает несимметрию питающей сети, так как становится источником ЭДС в фазе с наименьшим напряжением. Уравновешивающий эффект растет с уменьшением сопротивления обмотки [6].

Особо следует отметить осветительную нагрузку. В трехфазных симметрично нагруженных сетях с люминесцентными лампами и лампами ДРЛ ток в нулевом проводе не равен нулю, как в сетях с лампами накаливания, и достигает значительных величин вследствие протекания по нулевому проводу высших нечетных гармоник, обусловленных несинусоидальностью кривой питающего тока источников света вследствие нелинейности их вольт-амперных характеристик. Кроме этого, в момент пуска пускорегулирующая аппаратура генерирует импульсные напряжения амплитудой до 2 кВ. Ток I_0 в нулевом проводе определяется корнем квадратным от суммы квадратов токов нечетных высших гармоник, кратных трем:

$$I_0 = 3\sqrt{I_{3,1}^2 + I_{3,3}^2 + I_{3,5}^2 + I_{3,7}^2 + \dots}$$

Большая часть нагрузки нулевого провода создается токами третьей и пятой гармоник, составляющих от 56 до 85% фазного тока. Так как любая асимметрия нагрузки влечет за собой увеличение тока нейтрали, сечение нулевого провода в трехфазных симметрично нагруженных сетях с газоразрядными лампами выбирают по расчетному току, одинаковому с токами фазных проводов. Токи высших гармоник, протекающие по нулевому проводу, не увеличивают падение напряжения в фазах трехфазной сети, а создают пульсации напряжения с утроенной частотой сети. В сетях с лампами накаливания, при несимметричной нагрузке фаз, частичная потеря напряжения в нулевом проводе для двух фаз положительна, а для третьей фазы – отрицательна (и наоборот). Для каждого момента времени аналогичная диаграмма может быть построена и для сетей с газоразрядными лампами, но вектор угловой скорости в нулевом проводе имеет угловую скорость вращения в три раза большую, чем скорость вращения фазных векторов, и будет три раза в течение одного периода вызывать поочередно в каждой фазе то увеличение, то уменьшение потери напряжения, поскольку частичные потери напряжения будут то увеличиваться, то уменьшаться [9].

В сетях ЭЭС РФ количество современных компенсирующих устройств исчисляется единицами,

а фильтрокомпенсирующие, фильтросимметрирующие, фазосдвигающие устройства практически отсутствуют. Не существует программы их разработки и внедрения в электрических сетях, поэтому невозможно существенное повышение энергетической эффективности российской электроэнергетики. До 2007 г. при строительстве новых объектов (РП) в технических условиях предусматривался $\cos\varphi$ не ниже 0,93 ($\operatorname{tg}\varphi = 0,4$), за потребляемую реактивную электроэнергию не платили, а на летний период энергоснабжающие организации требовали от предприятий отключения всех компенсирующих устройств. Снижение коэффициента мощности предприятия автоматически повышало заявленную потребляемую установленную полную мощность, за что и платили предприятия энергосбытовым компаниям. Уменьшение $\cos\varphi$ при той же вырабатываемой генератором активной мощности (при неизменной активной нагрузке у потребителя) ведет к увеличению полной мощности генератора; у трансформаторов при уменьшении $\cos\varphi$ уменьшается пропускная способность по активной мощности вследствие увеличения реактивной нагрузки. Увеличение полной мощности при снижении $\cos\varphi$ приводит к возрастанию тока и к потерям мощности, которые пропорциональны квадрату тока. Увеличение тока требует повышения сечения линии электропередачи и веса проводов и кабеля. Увеличение тока при снижении $\cos\varphi$ ведет к увеличению потери напряжения во всех звеньях энергосистемы, вызывая понижение напряжения у потребителей электрической энергии. На предприятиях понижение напряжения нарушает нормальную работу электроприемников: снижается частота вращения электродвигателей, приводя к снижению производительности рабочих машин и ухудшению качества продукции; уменьшается производительность электрических печей, ухудшается качество сварки, снижается световой поток ламп, уменьшается пропускная способность заводских электрических сетей.

На сегодняшний день характер электрической нагрузки социально-бытового сектора однофазный и нелинейный. До 50% промышленно-индустриального сектора также составляет нелинейная нагрузка. Распределительные сети и силовые трансформаторы нагружены асимметрично, генерируя дополнительные потери электроэнергии в сетях и в силовых трансформаторах. При искажении формы тока возникают дополнительные потери на нагрев проводников

и обмоток и металлоконструкций трансформаторов. При 100% искажении формы тока пропускная способность трансформатора падает на 55%, растут потери в измерительных трансформаторах приборов учета тока и напряжения, нарушая работу релейной защиты и автоматики. В нулевых проводниках появляются токи нулевой последовательности, достигающие и превышающие значения фазных токов, приводящих к отгоранию нуля и возгоранию электропроводки [10].

Вместе с тем, в Указе Президента РФ № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» сказано о снижении потерь электроэнергии к 2020 г. на 40% по сравнению с 2007 г.

Нельзя сказать, что никаких эффективных мер по выравниванию нагрузки по фазам никто и никогда не предлагал. Для обеспечения требуемого напряжения в каждой из фаз сети традиционно используются однофазные и трехфазные стабилизаторы напряжения: феррорезонансные, автотрансформаторные, с вольдобавочными автотрансформаторами.

Предлагаемые авторами мероприятия позволяют повысить пропускную способность распределительных электрических сетей, надежность электроснабжения и безопасность однофазных потребителей электрического тока. Поставленная задача (рис. 1) достигается устройством для симметричного распределения однофазной нагрузки по фазам трехфазной сети [11], представляющим собой трехфазный разделительный одно- или многообмоточный (во вторичной цепи) трансформатор потребителя, каждая из вторичных обмоток которого имеет независимые от основной обмотки дополнительные витки, предназначенные для компенсации падения напряжения на линии, а каждый из потребителей многообмоточного разделительного трансформатора запитан от своей или от общей (для однообмоточного трансформатора) вторичной обмотки, в которой

линия каждого потребителя запитана от трехфазных катушек трансформатора, соединенных последовательно, любые две из которых включены согласованно, а третья – встречно.

Включение трехфазных катушек каждой вторичной обмотки трансформатора последовательно, любые две из которых включены согласованно, а третья – встречно позволяет получить однофазное переменное напряжение. Запитывание однофазной обмотки одновременно от трех фаз позволяет равномерно распределить нагрузку по фазам и обеспечить абсолютную симметрию нагрузки линии, трансформатора подстанции и автономного генератора независимо от того, отбирает однофазную нагрузку один или несколько потребителей, или все потребители одновременно потребляют различную мощность. Симметричная нагрузка автономного генератора линии и трансформатора подстанции позволяет увеличить пропускную способность электрической сети при пиках нагрузки, исключить перегрузку одной из фаз и предотвратить протекание тока по нулевому проводу, что позволит обеспечить повышение надежности всех защитных мероприятий, так как в принципе защищает сеть от «отгорания» нулевого провода.

Питание каждого из потребителей от своей обмотки многообмоточного трансформатора полностью исключает гальваническую связь с другими электропотребителями, повышая качество и безопасность электроснабжения.

Питание потребителя через разделительный трансформатор обеспечивает гальваническую развязку потребителя от внешней мощной сети и повышает безопасность электроснабжения. В этом случае появление тока в нулевом проводе свидетельствует либо об аварийной ситуации, либо о наличии у потребителя импульсной нагрузки.

Векторная диаграмма одной из возможных схем включения вторичных обмоток трансфор-

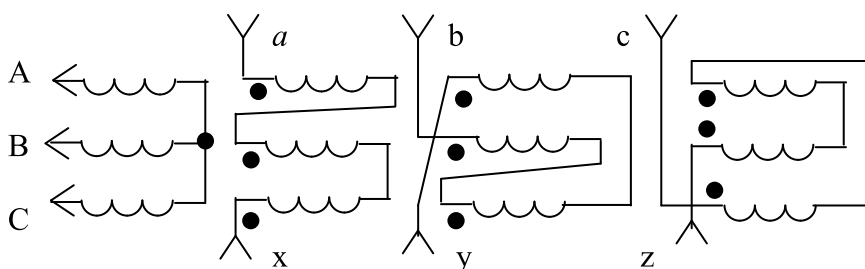


Рисунок 1 – Устройство для симметричного распределения однофазной нагрузки

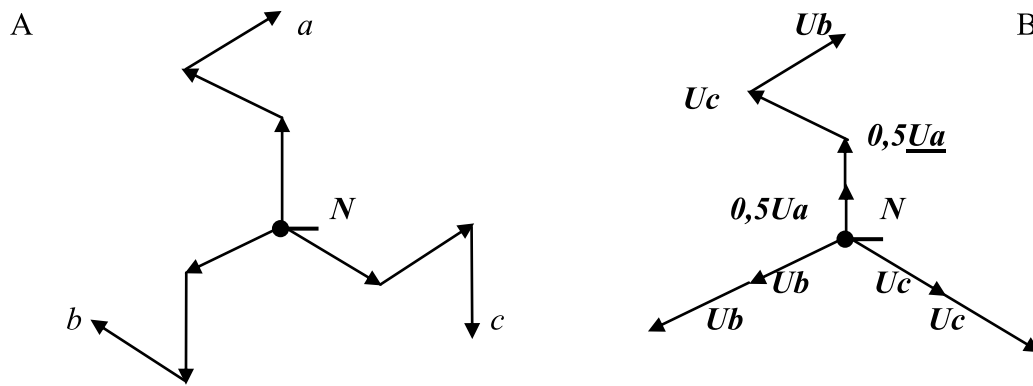


Рисунок 2 – А) Векторная диаграмма напряжений вторичных обмоток трансформатора
В) Восстановление вторичного напряжения оборванной фазы

матора (рис. 2 А) иллюстрирует возможность осуществления симметричной работы сети при несимметричной нагрузке.

Каждая из трех вторичных обмоток фазы генерирует 110 В, а их последовательное соединение обеспечивает на зажимах трансформатора фазное напряжение 220 В при условии включения каждой третьей обмотки фазы встречно по отношению к двум другим обмоткам. Независимо от нагрузок любой из фаз сеть и генератор всегда будут загружены равномерно по фазам, обеспечивая наиболее благоприятные условия работы генератора.

Исключения тока в нулевом проводе добиваются установкой фильтров высших гармоник. Наиболее эффективны активные фильтры. Разделительный трансформатор потребителя также

является заградительным фильтром, предохраняющим сеть от импульсных нагрузок.

Неразрывность магнитных потоков в магнитопроводе трансформатора делает возможным (хотя и со значительными искажениями симметрии фазных напряжений по фазе) восстановление трехфазного напряжения (рис. 2 В) даже при обрыве одного (любого) фазного проводника сети между генератором и трансформатором [13].

Предлагаемые авторами решения [11, 12] позволяют «отрабатывать» изменения нагрузки трансформаторами – аналоговыми электрическими машинами – без вмешательства сложных управляющих систем, исключая оперативное вмешательство в работу энергосистемы и предотвращая возможность возникновения несчастных случаев.

Литература

1. Анализ травматизма на энергоустановках, подконтрольных Ростехнадзору за 2016 год [Текст] // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 3. – С. 18–21.
2. Шаманов, Д.Г. Качество электроэнергии. Применение бустеров для повышения качества электроэнергии [Текст] / Д.Г. Шаманов // Электроэнергия. Передача и распределение: сб. докладов XIX заседания Ассоциации электроснабжения городов России. «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО». – Ханты-Мансийск, 2013. – С. 34–37.
3. Кадыков, Ю.М. Обеспечение надежности электроснабжения потребителей в сельской местности [Текст] / Ю.М. Кадыков, О.Ю. Кадыкова // Энергетик. – 2016. – № 3. – С. 3–7.
4. Косоухов, Ф.Д. Снижение потерь электроэнергии в сельских сетях 0,38 кВт при несимметричной нагрузке [Текст] / Ф.Д. Косоухов, В.Ф. Петров, М.Ю. Теремецкий, Н.Ю. Криштопа // Техника в сельском хозяйстве. – 2013 – № 5. – С. 14–17.
5. Косоухов, Ф.Д. Симметрирование однофазных нагрузок в сельских электрических сетях [Текст] / Ф.Д. Косоухов, А.О. Филиппов, Н.В. Васильев, Б.Н. Боршнин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2013. – № 2. – С. 9–13.
6. Попов, Н.М. Электроснабжение. Рабочие режимы сетей 0,38...10 кВ [Текст] / Н.М. Попов. – Кострома: КГСХА, 2010. – 202 с.
7. Сергеевков, Б.Н. Электрические машины. Трансформаторы [Текст] / Б.Н. Сергеевков, В.М. Киселев, В.А. Акимова. – М.: Высшая школа, 1989. – 352 с.
8. Орлов П.С. Трансформаторы [Текст]: в 2-х ч. Часть II. Трехфазные силовые трансформаторы / П.С. Орлов. – Ярославль: ЯГСХА, 2006. – 75 с.

9. Анчарова, Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений [Текст] / Т.В. Анчарова, М.А. Рашевская, Е.Д. Стебунова. – М.: Форум, 2014. – 416 с.

10. Аршинов, Н.П. О компенсации реактивной мощности [Текст] / Н.П. Аршинов // Электрика. – 2008. – № 2. – С. 8–11.

11. Пат. 2506676 Российская Федерация. Устройство для симметричного распределения однофазной нагрузки по фазам трехфазной сети [Текст] / Орлов П.С., Голдобина Л.А., Шкрабак В.С. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Ярославская ГСХА». – № 2012115381/07; заявл. 17.04.12; опубл. 10.02.14, Бюл. № 4. – 5 с.

12. Решение о выдаче патента на полезную модель от 14.11.16. Российская Федерация. Трехфазный трехобмоточный трансформатор, предназначенный для симметричного распределения нагрузки по фазам трехфазной сети [Текст] / Орлов П.С., Голдобина Л.А., Морозов В.В., Кочкин С.П. – № 2016102603; заявл. 26.01.15.

References

1. Analiz travmatizma na jenergoustanovkah, podkontrol'nyh Rostehnadzoru za 2016 god [Tekst] // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2017. – № 3. – С. 18–21.

2. Shamanov, D.G. Kachestvo jelektrojenergii. Primenenie busterov dlja povyshenija kachestva jelektrojenergii [Tekst] / D.G. Shamanov // Jelektrojenergija. Peredacha i raspredelenie: sb. dokladov XIX zasedanija Associacii jelektrosnabzhenija gorodov Rossii. «PROGRESSJELEKTRO». – Hanty-Mansijsk, 2013. – С. 34–37.

3. Kadykov, Ju.M. Obespechenie nadezhnosti jelektrosnabzhenija potrebitelej v sel'skoj mestnosti [Tekst] / Ju.M. Kadykov, O.Ju. Kadykova // Jenergetik. – 2016. – № 3. – С. 3–7.

4. Kosouhov, F.D. Snizhenie poter' jelektrojenergii v sel'skih setjah 0,38 kVt pri nesimmetrichnoj nagruzke [Tekst] / F.D. Kosouhov, V.F. Petrov, M.Ju. Teremeckij, N.Ju. Krishtopa // Tehnika v sel'skom hozjajstve. – 2013 – № 5. – С. 14–17.

5. Kosouhov, F.D. Simmetrirovanie odnofaznyh nagruzok v sel'skih jelektricheskikh setjah [Tekst] / F.D. Kosouhov, A.O. Filippov, N.V. Vasil'ev, B.N. Boroshnin // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – 2013. – № 2. – С. 9–13.

6. Popov, N.M. Jelektrosnabzhenie. Rabochie rezhimy setej 0,38...10 kV [Tekst] / N.M. Popov. – Kostroma: KGSHA, 2010. – 202 s.

7. Sergeenkov, B.N. Jelektricheskie mashiny. Transformatory [Tekst] / B.N. Sergeenkov, V.M. Kiselev, V.A. Akimova. – М.: Vysshaja shkola, 1989. – 352 s.

8. Orlov P.S. Transformatory [Tekst]: v 2-h ch. Chast' II. Trehfaznye silovye transformatory / P.S. Orlov. – Jaroslavl': JaGSHA, 2006. – 75 s.

9. Ancharova, T.V. Jelektrosnabzhenie i jelektrooborudovanie zdaniy i sooruzhenij [Tekst] / T.V. Ancharova, M.A. Rashevskaja, E.D. Stebunova. – М.: Forum, 2014. – 416 s.

10. Arshinov, N.P. O kompensacii reaktivnoj moshnosti [Tekst] / N.P. Arshinov // Jelektrika. – 2008. – № 2. – С. 8–11.

11. Пат. 2506676 Rossijskaja Federacija. Ustrojstvo dlja simmetrichnogo raspredelenija odnofaznoj nagruzki po fazam trehfaznoj seti [Tekst] / Orlov P.S., Goldobina L.A., Shkrabak V.S. i dr.; zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «Jaroslavskaja GSHA». – № 2012115381/07; zajavl. 17.04.12; opubl. 10.02.14, Bjul. № 4. – 5 s.

12. Reshenie o vydache patenta na poleznuju model' ot 14.11.16. Rossijskaja Federacija. Trehfaznyj trehobmotochnyj transformator, prednaznachennyj dlja simmetrichnogo raspredelenija nagruzki po fazam trehfaznoj seti [Tekst] / Orlov P.S., Goldobina L.A., Morozov V.V., Kochkin S.P. – № 2016102603; zajavl. 26.01.15.