

## Инженерно-технические мероприятия снижения аварийности и электротравматизма в электрических сетях

**Владимир Степанович Шкрабак<sup>1</sup>, Павел Сергеевич Орлов<sup>2</sup>, Вадим Владимирович Морозов<sup>2</sup>, Роман Владимирович Шкрабак<sup>1</sup>, Ольга Николаевна Круду<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, v.shkrabak@mail.ru

<sup>2</sup>Ярославская государственная сельскохозяйственная академия, г. Ярославль, Россия. ps2009yasam@mail.ru

**Аннотация.** До настоящего времени практически единственным способом обеспечения симметричной загрузки сетей переменного тока напряжением до 0,4 кВ является как можно более равномерное физическое подключение нагрузки к фазам трехфазной сети. Этот прием не обеспечивает постоянной симметрии нагрузки, что влечет за собой снижение пропускной способности силовых сетей и трансформаторов, повышение потерь в сети, снижение надежности электроснабжения потребителей. Авторы предлагают инновационное устройство для симметричного распределения однофазной нагрузки по фазам трехфазной сети. Это позволяет решить ряд проблем, касающихся надежности электроснабжения, аварийности, электротравматизма, отказов системы энергообеспечения и сокращения времени перерывов в энергообеспечении, а, значит, и потеря сельхозтоваропроизводителей.

**Ключевые слова:** электрификация, электросети, трансформаторы, электродвигатели, асимметрия, аварийность, электротравматизм.

**Для цитирования:** Шкрабак В. С., Орлов П. С., Морозов В. В., Шкрабак Р. В., Круду О. Н. Инженерно-технические мероприятия снижения аварийности и электро-травматизма в электрических сетях // Аграрный научный журнал. 2021. № 10. С. 117–124. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2021i10pp117-123>.

### AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

## Engineering measures for accident reduction and electrotraumatism in electric networks

**Vladimir S. Shkrabak<sup>1</sup>, Pavel S. Orlov<sup>2</sup>, Vadim V. Morozov<sup>2</sup>, Roman V. Shkrabak<sup>1</sup>, Olga N. Krudu<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>St. Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, Russia. v.shkrabak@mail.ru

<sup>2</sup>Yaroslavl State Agricultural Academy, Yaroslavl, Russia. ps2009yasam@mail.ru

**Abstract.** Until now, almost the only way to ensure symmetrical loading of AC networks with a voltage of up to 0.4 kV is to connect the load as uniformly as possible to the phases of the three-phase network. This technique does not provide constant symmetry of the load, which entails a decrease in the throughput of power networks and transformers, an increase in network losses, and a decrease in the reliability of power supply to consumers. The authors propose an innovative device for symmetric distribution of single-phase load over phases of a three-phase network. This allows us to solve a number of problems related to the reliability of electricity supply, accidents, electrotraumatism, failures of the energy supply system and reducing the time of interruptions in energy supply, and, therefore, losses of manufacturers

**Keywords:** electrification, electrical networks, transformers, electric motors, asymmetry, accident rate, electrotraumatism.

**For citation:** Shkrabak V. S., Orlov P. S., Morozov V. V., Shkrabak R. V., Krudu O. N. Engineering measures for accident reduction and electrotraumatism in electric networks. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2021;(10): 117–124 (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2021i10pp117-123>.

**Введение.** Потребителями электрической энергии значительного количества электрических сетей в РФ являются мощные одно- и двухфазные потребители железных дорог, систем электрохимической защиты трубопроводов Газпрома, горнодобывающего и нефтедобывающего комплексов РФ и жилого комплекса коммунального хозяйства, а также маломощные и длинные сети напряжением 6–10 кВ, питающие распределительные сети сельскохозяйственных предприятий напряжением 0,4/0,23 кВ, к которым подключены как трехфазные, так и однофазные (и двухфазные) электропотребители. Невозможно абсолютно равномерно распределить однофазные (и не полнофазные) электроприемники по трем фазам четырехпроводной и пятипроводной систем и обеспечить равномерность графика потребления нагрузки по фазам вследствие несовпадения графиков нагрузки отдельных потребителей. Осветительная нагрузка предприятий с электронным балластом люминесцентных ламп генерирует высшие гармоники и все люминесцентные лампы импульсные нагрузки высокого (до 2 кВ) напряжения. Драйверы (импульсные блоки питания) светодиодных ламп, работающие на частотах от 30 до 150 кГц, смонтированные в патроне (или в трубке) лампы, преобразуя напряжение 220 В в стабилизированное напряжение питания светодиодов, в большинстве случаев генерируют (как и частотный электропривод силовых потребителей) спектр гармоник. Импульсные блоки питания современных персональных компьютеров индивидуальных потребителей, торговых предприятий и многочисленных офисов и большинство современной бытовой техники также генерируют спектры гармоник. Поэтому всегда наблюдается неравномерная загрузка сети по фазам, приводящая к искажению фазных и линейных напряжений у потребителя с нарушением симметрии токов в фазных проводах, а в нулевом проводе (в нейтрали) появляется ток, равный геометрической (векторной) сумме фазных токов.

**Методика исследований.** Объекты исследований – электрические сети производственных, коммунально-хозяйственных и социально-бытовых потребителей электрической энергии, характеризующихся вероятностным характером распределения нагрузки по фазам электросети и временем включения нагрузки, приводящим к работе электросети в режиме асимметрии, понижая эффективность и уровень электробезопасности, удорожая стоимость электроэнергии и снижая надежность работы электрооборудования. Методы основаны на изучении ситуации в реальных условиях жизнедеятельности объектов хозяйственного и агропромышленного комплексов страны с учетом разнообразия потребителей по уровню нагрузки и времени ее использования



**Результаты исследований.** Повышение энергоэффективности и сокращение технологических потерь электрической энергии в электрических сетях – одна из основных задач Единой технической политики в электросетевом комплексе (ЭСК) ПАО «Россети», основные задачи которого изложены в Положении ОАО «Россети» о Единой технической политике в электросетевом комплексе» [1].

В случае асимметрии появляющийся ток в нулевом проводе вызывает падение напряжения  $U_N$  и смещение нейтрали, что приводит (при несимметричной нагрузке) к потерям фазного напряжения на участках сети. В большинстве случаев несимметричная нагрузка на присоединении приводит к искажению симметрии напряжений у всех потребителей этого присоединения. По мере приближения от потребителя с несимметричной нагрузкой к источнику неограниченной мощности искажения напряжения уменьшаются. Несимметричная нагрузка ведет к тому, что в фазных проводах текут разные токи; появляется ток и в нулевом проводе, что сказывается на потерях мощности и энергии в линии, которые в два и более раз превышают потери электрической энергии по сравнению с сетями, работающими в симметричных режимах [2, 3].

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, а в момент включения пуско-регулирующей аппаратуры генерирует импульсные напряжения амплитудой до 2 кВ. Ток  $I$  в нулевом проводе определяется корнем квадратным от суммы квадратов токов нечетных высших гармоник, кратных трем:

$$I = \sqrt{3(I_{31})^2 + (I_{33})^2 + (I_{35})^2 + (I_{37})^2 + \dots} \quad (1)$$

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 будет иметь 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. Особенностью осветительной сети являются большие токи, поэтому групповые щитки выполняются на токи до 63 А. Питающие сети имеют нагрузку не более 250 А [4].

Увеличение сечения проводов снижает потери мощности, симметрирование нагрузки приводит к сокращению электрических потерь в сетях, а равномерное распределение нагрузки по фазам снижает электрические потери в сети в 6 раз по сравнению с однофазной нагрузкой [5]. Неравномерная нагрузка отрицательно сказывается не только на работе линии, но и на работе трансформаторов. Отсутствие симметрии вторичных напряжений трансформаторов неблагоприятно отражается на потребителях: у асинхронных электродвигателей при питании их несимметричными напряжениями появляются симметричные составляющие токов обратной последовательности, магнитный поток становится эллипсным и электрическая машина генерирует обратный вращающий момент, снижающий крутящий момент на валу машины, вызывающий повышенный ток и перегрев электродвигателя; у ламп накаливания при питании повышенным напряжением резко снижается срок службы, а пониженное напряжение существенно снижает световой поток [5, 6].

Трехфазные асинхронные машины проектируют для работы с коэффициентом обратной последовательности  $K_{2U} \leq 2\%$ . В сельскохозяйственных и промышленных сетях с двухфазной нагрузкой этот норматив часто нарушается. При работе электродвигателя на номинальном вращающем моменте  $K_{2U} = 4\%$  срок службы изоляции снижается в 2 раза. Следует учесть, что при несимметрии напряжений одно- или двухфазных сетей напряжения могут превышать номинальное значение; тогда срок службы изоляции электрооборудования сокращается еще больше. Поскольку нулевая точка электродвигателя не соединяется с нулевой точкой источника, то токи нулевой последовательности не протекают через статорные обмотки, поэтому система токов, протекающих в статорных обмотках при несимметрии питающих напряжений, может быть разложена только на токи прямой и обратной последовательностей. Частота тока обратной последовательности в роторе почти в 2 раза выше, чем для симметричных составляющих прямой последовательности. Сколько же тока прямой последовательности  $s_1$ :

$$s_1 = s_{HOM} = (n_1 - n_2)/n_r \quad (2)$$

Сколько же тока обратной последовательности  $s_2$ :

$$s_2 = [n_1 - (-n_2)]/n_1 = (n_1 + n_2)/n_r \quad (3)$$

Подставим в формулу (2) значение  $n_2$ :

$$\begin{aligned} n_2 &= n_1 - n_r s_{HOM}, \\ s_2 &= [n_1 - (-n_2)]/n_1 = (n_1 + n_2)/n_1 = [n_1 + n_1(1 - s_{HOM})]/n_1 = 2 - s_{HOM}. \end{aligned} \quad (4)$$



Это перегревает ротор, температура которого на 35...40 ° выше, чем температура статора. Тепловое расширение стержней ротора приводит к повреждению роторной обмотки машины, снижает мощность электродвигателя и вызывает периодические колебания потребляемых токов (в асинхронных машинах снижение врачающего момента незначительно только до  $K_{2U} \leq 4\%$ ). Значительная несимметрия (более 5 %) приводит к вибрации электродвигателя в результате появления знакопеременных вращающих моментов и сил, пульсирующих с удвоенной частотой. Вместе с тем электродвигатель, работающий под нагрузкой или вхолостую, уменьшает несимметрию питающей сети, так как становится источником ЭДС в фазе с наименьшим напряжением. Такой уравновешивающий эффект растет с уменьшением сопротивления обмотки [5] (у двигателей большой мощности).

В сельских распределительных сетях напряжением 0,4610 кВ суммарной протяженностью до 2 млн. км сосредоточено порядка 450 тыс. трансформаторных подстанций. В распределительном сетевом комплексе средняя степень износа электросетевых объектов составляет до 69 %. При этом 57 % ВЛ напряжением 6–10 кВ и 55 % ТП отработали свыше 30 лет. В сетях напряжением 6–20 кВ происходит в среднем до 30 отключений в год в расчете на 100 км линий, а в сетях напряжением 0,4 кВ – до 100 отключений, что в общей сложности приводит к 5–6 отключениям потребителей. Основные повреждения в сетях 6–10 кВ – схлестывание проводов в пролетах 30 %, пробои изоляции ВЛ 28 %, повреждение проволочных вязок проводов – 15 % [7]. Для поддержания качества электроэнергии необходимо соблюдение ГОСТ 32144 – 2013 [8].

Низкая надежность электроснабжения потребителей обусловлена в первую очередь устаревшими требованиями ПУЭ в части длительности допустимых перерывов электроснабжения электропотребителей второй и третьей категорий. А между тем в сельскохозяйственном производстве перерывы в электроснабжении ведут к недополучению продукции, стрессу животных и птицы, выбраковке и гибели животных и урожая культур. Недополучение продукции при перерывах электроснабжения составляет: молока – более 0,5 л с одной коровы, яиц – 2 шт. на голову, овощей – 0,1 кг с 1 м<sup>2</sup> каждые 2 часа; мяса КРС – более 0,5 кг на голову свинины – более 2-х кг на голову, мяса птицы – 5 кг на 100 голов каждые 4 часа. В летнее время при отключении вентиляции на птицефермах и повышении температуры воздуха растет концентрация аммиака и CO<sub>2</sub>, что ведет к заболеванию и выбраковке птицы. При температуре воздуха +40 С через 5 ч после отключения электроснабжения птица гибнет, а выбраковка нарастает при перерывах электроснабжения более 2 часов. Стрессы ведут к снижению яйценоскости, на восстановление которой требуется 10–15 дней. Таким образом – 2 часа – предел, после которого у производителя возникает ущерб от недоотпуска продукции или нарушается нормальное функционирование производства [9].

На линиях 10 кВ следует применять провода СИП–3 как при строительстве новых линий, так и при замене существующих проводов марок А и АС. Сечения проводов и жил кабелей необходимо выбирать с учетом перспективного роста нагрузок на ближайшие 10 лет. Сечение проводов ЛЭП должно быть не менее 70 мм<sup>2</sup> [10].

Неравномерная нагрузка отрицательно сказывается не только на работе линии, но и на работе трансформаторов. Отсутствие симметрии вторичных напряжений трансформаторов неблагоприятно отражается на потребителях: у асинхронных электродвигателей при питании их несимметричными напряжениями появляются симметричные составляющие токов обратной последовательности, магнитный поток становится эллипсным, и электрическая машина генерирует обратный вращающий момент, снижающий крутящий момент на валу машины, вызывающий повышенный ток и перегрев электродвигателя; у ламп накаливания при питании повышенным напряжением резко снижается срок службы ламп накаливания пониженным напряжением; существенно снижается световой поток.

У трансформаторов несимметричная нагрузка вызывает перегрузку отдельных его обмоток, повышение фазных напряжений и насыщение магнитопровода. Работу трансформаторов в несимметричных режимах объясняют с помощью симметричных составляющих, в которых векторы токов прямой последовательность 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 равенство 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 охватывает первичную и вторичную обмотки и являются потоками взаимной индукции, индуцирующие 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 [6, 11].

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 [5].

До настоящего времени практически единственным способом обеспечения симметричной загрузки трехфазных трех-, четырех- и пятипроводных сетей (три фазы – ноль, 3 фазы, ноль и защитный проводник) перемен-

ного тока напряжением до 1000 В (и трехфазных силовых трансформаторов того же напряжения) на вторичной обмотке равномерной нагрузкой по фазам (при наличии в сетях однофазных потребителей) является как можно более равномерное (по потребляемой мощности) физическое подключение нагрузки к фазам трехфазной сети (симметричное распределение нагрузки по фазам). Этот прием, тем не менее, не обеспечивает постоянной (хотя бы примерной) симметрии нагрузки ни сетей, ни силовых трансформаторов как из-за различной потребляемой мощности однофазных потребителей, так и из-за несовпадения графиков их нагрузки по фазам во времени, что влечет за собой снижение пропускной способности силовых сетей и трансформаторов, повышение потерь в сети вследствие протекания тока по нулевому проводу, снижения надежности электроснабжения потребителей из-за возможной перегрузки одной из фаз и ее отключения защитой. Для обеспечения требуемого напряжения в каждой из фаз сети традиционно используются однофазные и трехфазные стабилизаторы напряжения: феррорезонансные, автотрансформаторные, с вольтдобавочными автотрансформаторами.

На сегодняшний день характер электрической нагрузки социально – бытового сектора однофазный и нелинейный. До 50 % промышленно – индустриального сектора составляет нелинейная нагрузка. Распределительные сети и силовые трансформаторы нагружены асимметрично, что приводит к дополнительным потерям 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, приборах учета тока и напряжения, нарушая работу релейной автоматики. В нулевых проводниках появляются токи нулевой последовательности, достигающие и превышающие значения фазных токов, приводящих к «отгоранию» нулевого провода и возгоранию электропроводки [12].

Общая оценка потерь электроэнергии в РФ достигает 15–20 %. В целом по стране это составляет 100–2000 млрд кВт·ч – примерно 20–25 ГВт электрической установленной мощности. Напряжение обратной последовательности нарушают оптимальные режимы работы электрооборудования: токи обратной последовательности вызывают дополнительный разогрев асинхронных электродвигателей, создают обратный вращающий момент, повышая скольжение ротора, снижают скорость вращения ротора асинхронных машин. Снижение числа оборотов ротора машины уменьшает крутящий момент на валу машины и ее производительность. Падение числа оборотов ротора (рост скольжения) сопровождается увеличением потребления реактивной мощности, приводящее к снижению напряжения на зажимах машины. Описанные негативные явления ведут к сокращению срока службы электрических машин. В связи с введенными ограничениями на несимметрию напряжений, определена зависимость допустимого сопротивления питающей линии в зависимости от мощности однофазной нагрузки. В протяженных сетях несимметрия напряжений может выйти за нормированные значения: при однофазной нагрузке 100 кВА; допустимая длина линии, выполненная проводом АС79/11, составляет не более 39,5 км. При двухфазной нагрузке  $S_{\text{НД}} = 100 \text{ кВА}$ , и  $S_{\text{НВС}} = 10 \text{ кВА}$ ,  $\cos_{\text{НВС}} = 0,9$  длина линии не должна превышать 44,2 км [7].

Суммарные потери в силовых трансформаторах зависят от потерь холостого хода  $P_{\text{ХХ}}$  и короткого замыкания  $P_{\text{КЗ}}$ , а коэффициент полезного действия трансформатора определяются выражением

$$\eta = (kS_{\text{ном}} P_{\text{ХХ}} k^2 P_{\text{КЗ}}) / kS_{\text{ном}}, \quad (5)$$

зависящим от коэффициента нагрузки  $k = S_{\text{полн}} / S_{\text{ном}}$ , где  $S_{\text{ном}}$ ;  $P_{\text{ХХ}}$ ;  $P_{\text{КЗ}}$ ;  $S_{\text{полн}}$  соответственно номинальная мощность трансформатора, кВА; потери холостого хода при номинальном напряжении, кВт; потери короткого замыкания при номинальной мощности, кВт; полная мощность трансформатора, подводимая к первичной обмотке из внешней цепи, кВА соответственно, откуда видно, что трансформатора существенно зависит от его нагрузки, а максимум коэффициента полезного действия достигается при  $k_{\text{MAX}} = (P_{\text{ХХ}} / P_{\text{КЗ}})^{0.5}$ .

Максимальное значение трансформатора:

$$\eta_{\text{MAX}} = 1 (2 P_{\text{ХХ}} / k_{\text{MAX}} S_{\text{ном}}). \quad (6)$$

Максимальный трансформатора с потерями по ГОСТ 2736087 составляет 98,699,3 % при нагрузке 37–43 %. Ряд отечественных заводов производит трансформаторы со сниженными «энергосберегающими» относительно указанного ГОСТ потерями, у которых максимум соответствует 98,899,3 % при нагрузке 30–37 % [1, 13].

Несколько иная ситуация с потерями распределительных трансформаторов имеет место в странах Европейского союза, в которых в последние годы планомерно повышаются требования к энергоэффективности трансформаторного оборудования. Нормативный документ МЭК 60076–20 представляет собой перевод требований Постановления Совета Европы в разряд международного стандарта, имеющего действие не только на территории Европейского союза, но и в других странах мира. Дальнейшее повышение энергоэффективности возможно за счет применения трансформаторов с магнитопроводами из аморфных сплавов. Для трансформаторов типа ТМГА630/10 максимальный =99,6 % при нагрузке около 20 % (наиболее значимое увеличение имеет место в области малых нагрузок 5–25 %), что характерно для трансформаторов с магнитопроводами из аморфных сплавов, отличающихся сниженными более чем в 2 раза потерями холостого хода [1, 13].

Отсюда: при загрузке менее 40 % применение трансформаторов с магнитопроводами из аморфных сплавов дает существенное повышение энергоэффективности по сравнению с трансформаторами с «нормальными» потерями по ГОСТ 2736087, оптимизированными для работы с нагрузкой 40–50 %, а при загрузке свыше 50 % нагрузочные



потери превалируют в суммарных потерях трансформатора и применение трансформаторов с магнитопроводом из аморфных сплавов не дает столь существенного повышения энергоэффективности [1, 13].

В целом по АО «МРСК Центра» около 56 % трансформаторов 6–10 кВ работают с загрузкой не более 20 %, а 24 % с загрузкой 20–50 % [13].

Поскольку большая часть установленных в сетях трансформаторов характеризуется режимом работы с нагрузкой, соответствующей наибольшему значению, достигаемому менее чем в четверти всех случаев эксплуатации, а более чем в половине случаев эксплуатации загрузка не превышает 20 %, для повышения энергоэффективности этой группы целесообразна установка трансформаторов с потерями ХХ на уровне трансформаторов с магнитопроводом из аморфных сплавов [13].

Парк асинхронных машин в сельском хозяйстве РФ составляет до 10 млн единиц. Современное состояние парка асинхронного электропривода выдвигает ряд технико-экономических и научных проблем, связанных с моральным старением и физическим износом парка электрооборудования, обеспечивающего электропривод в сельскохозяйственном производстве, несоответствия его структуры условиям эксплуатации, высоким уровнем потерь электроэнергии в сельском хозяйстве РФ, низким качеством диагностики и ремонта электродвигателей. Следствие этого – высокий расход сельскохозяйственных предприятий на оплату электрической энергии, внеплановые ремонты и замену асинхронных машин, компенсацию затрат, связанных с простотой технологического оборудования. Основными причинами потерь электроэнергии и преждевременного выхода из строя асинхронных электродвигателей – несимметричные режимы их работы прежде всего из-за несимметричных режимов работы электрических сетей, характерных для большинства сетей, питающих сельскохозяйственные предприятия. Это вызвано и физическим износом электродвигателей, малой мощностью длинных сельских электрических сетей, широкой распространенностю неполнофазных режимов у трехфазных электродвигателей и применением электродвигателей, питающихся от однофазной сети. Прямые потери электроэнергии сельского хозяйства РФ в связи с несимметричными режимами составляют около 1 млрд. кВт часов в год. Несимметричные режимы способствуют выходу из строя асинхронных электродвигателей. При допустимом (в соответствии с ГОСТ 13109–97) значении действующего постоянно напряжения симметричных составляющих обратной последовательности в 4 % срок безаварийной эксплуатации электродвигателей сокращается наполовину. Вместе с тем, нередки случаи, когда на сельскохозяйственных предприятиях симметричные составляющие обратной последовательности достигают 15–20 %. Положение усугубляется тем, что 93 % асинхронных электродвигателей сельскохозяйственного парка составляют электродвигатели общего назначения, не приспособленные и не предназначенные для эксплуатации в условиях сельскохозяйственного производства. Средний ущерб от отказа одного электродвигателя в сельском хозяйстве оценивается осреднено в 8,2 тыс. руб. Принимая во внимание ежегодный выход из строя около 20 % парка асинхронных машин, сумма ущерба от несимметричных режимов в масштабе РФ составляет свыше 15 млрд руб. в год. Способствуют физическому износу наличие агрессивной внешней среды (газов, резких суточных и сезонных колебаний температуры и влажности воздуха), низкое качество электроэнергии длинных и маломощных «сельских» электрических сетей, широкое распространение однофазных и нелинейных нагрузок, частые переходные процессы, низкое качество ремонта и обслуживания электродвигателей, удаленность ремонтных баз, не укомплектованность их современным диагностическим и испытательным оборудованием. Все это обуславливает высокому уровню потерь электроэнергии, интенсивному износу и выходу из строя электрических машин. В настоящее время износ электрооборудования перерабатывающих предприятий агропромышленного комплекса превышает 50 %, а животноводческих ферм 85 %. Ежегодно в АПК выходит из строя до 38,5 % парка асинхронных машин, направляемся в ремонт 20 % электродвигателей [14].

Неудовлетворительное состояние электрических сетей систем сельского электроснабжения создает предпосылки возникновения аварийных режимов работы, сокращающих срок службы электродвигателей. Наиболее распространенная причина повреждения трехфазных электродвигателей асимметрия питающего напряжения и обрыв фазы. Для защиты трехфазных электродвигателей от асимметрии питающего напряжения предлагается классический фильтр нулевой последовательности, работающий в релейном режиме, отключая при необходимости электродвигатель [15].

Для симметричного распределения нагрузки по фазам трехфазной сети в Белоруссии разработано специальное симметрирующее устройство (рис. 1), представляющее из себя дополнительную обмотку, наматываемую поверх всех трех фазных обмоток трансформатора  $Y/Y_N$ , включаемую в разрыв нулевого провода. Обмотка симметрирующего устройства рассчитана на длительное протекание номинального тока трансформатора (на полную однофазную нагрузку) и включена таким образом, что создаваемые ею в магнитопроводе трансформатора магнитные потоки  $F_{0K}$  нулевой последовательности полностью компенсируют противоположно направленные магнитные потоки нулевой последовательности  $F_{0P}$  в рабочих обмотках трансформатора, предотвращая перекос фазных напряжений [16].

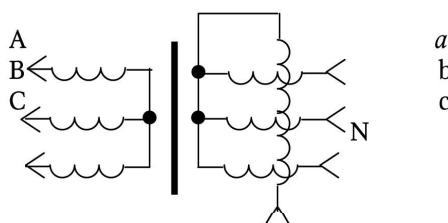


Рис. 1. Симметрирующее устройство



Но симметрирующее устройство, как и трансформатор с обмотками, включенными по схеме зигзаг, только уменьшает генерирование магнитных потоков нулевой последовательности, несколько снижая перекос фазных напряжений, но устранить асимметрию нагрузки по фазам не в состоянии.

Имеется устройство симметрирования неполнофазных режимов на линии 10 кВ для удаленных потребителей [17].

Изобретение относится к области электротехники и может быть использовано для создания надежных систем электроснабжения потребителей электроэнергии, находящихся на значительном удалении от узлов питания. Технический результат - повышение надежности работы линии 10 кВ, восстановление неполнофазных режимов при выпадении одной фазы или в случае однофазного металлического замыкания на землю, равномерное распределение нагрузки по фазам, мобильность и автономность устройства. Для достижения технического результата устройство симметрирования неполнофазных режимов на линии 10 кВ для удаленных потребителей содержит токоограничивающий реактор, разрядники и преобразующий блок, состоящий из трехфазного выпрямителя, входы которого подключены через токоограничивающий реактор и разрядники к трехпроводной сети, к выходам которого подключен емкостной делитель параллельно ему включен трехфазный пятиуровневый инвертор, управляющие электроды которого соединены с блоком управления, подключенного через батарею к фотоэлектрическому преобразователю (рис. 2).

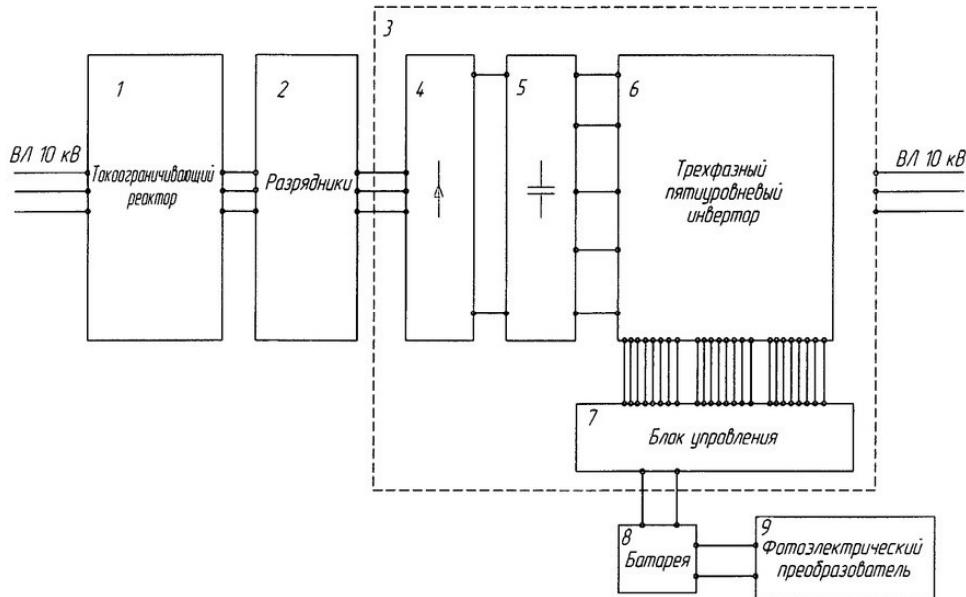


Рис. 2. Устройство симметрирования неполнофазных режимов

Изобретение относится к области электротехники и может быть использовано для создания надежных систем электроснабжения потребителей электроэнергии, находящихся на значительном удалении от узлов питания.

Задача изобретения – повышение надежности работы линии 10 кВ, восстановление неполнофазных режимов при выпадении одной фазы или в случае однофазного металлического замыкания на землю, равномерное распределение нагрузки по фазам, мобильность и автономность устройства.

Для достижения поставленной задачи устройство симметрирования неполнофазных режимов на линии 10 кВ для удаленных потребителей содержит преобразующий блок, трехфазный инвертор, запитывающий трехфазную нагрузку, причем токоограничивающий реактор и разрядники подключены к входам трехфазного выпрямителя преобразующего блока, выходы которого соединены через емкостной делитель с трехфазным пятиуровневым инвертором, блок управления которого получает независимое автономное питание от батареи, заряжаемой фотоэлектрическим преобразователем.

Устройство симметрирования неполнофазных режимов на линии 10 кВ для удаленных потребителей состоит из токоограничивающего реактора 1, разрядников 2 и преобразующего блока 3, состоящего из трехфазного выпрямителя 4, входы которого подключены через токоограничивающий реактор 1 и разрядники 2 к трехпроводной сети, к выходам которого подключен емкостной делитель 5; параллельно ему включен трехфазный пятиуровневый инвертор 6, управляющие электроды которого соединены с блоком управления 7, подключенного через батарею 8 к фотоэлектрическому преобразователю 9.

При нормальном режиме работы линии переменное напряжение, прикладываемое через токоограничивающий реактор 1 и разрядники 2 к трехфазному выпрямителю 4 преобразующего блока 3, выпрямляется и поступает к емкостному делителю 5 с параллельно включенному ему трехфазному пятиуровневому инвертору 6, где выпрямленное напряжение преобразовывается в переменное с равномерным распределением нагрузки по фазам. Блок управления 7 получает питание от батареи 8, заряжаемой от фотоэлектрических преобразователей 9.

При аварийном режиме в первый момент времени всплески токов и напряжений гасятся токоограничивающим реактором 1 и разрядником 2, что обеспечивает защиту преобразующего блока 3. В установившемся

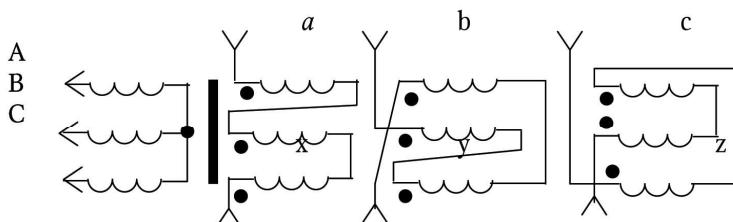


режиме неполнофазное переменное напряжение поступает на трехфазный выпрямитель 4, а затем выпрямленное – на трехфазный пятиуровневый инвертор 6, на выходе которого формируется симметричное трехфазное напряжение, питающее потребителя. Питание блока управления 7 от батареи 8, заряжаемой от фотоэлектрических преобразователей 9, обеспечивает автономность устройства, мобильность (возможность установки в любом месте линии), снижает массогабаритные показатели преобразователя 3 и обеспечивает его работоспособность, то есть бесперебойное питание трехфазных потребителей, в случае исчезновения одной из фаз.

Авторы предлагают повысить пропускную способность распределительных электрических сетей, надежность электроснабжения и безопасность однофазных потребителей электрического тока устройством для симметричного распределения однофазной нагрузки по фазам трехфазной сети, 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 трех фазных катушек трансформатора, соединенных последовательно, любые две из которых включены согласованно, а третья – встречечно (рис. 3) [18].

Включение трехфазных катушек каждой вторичной обмотки трансформатора последовательно, любые две из которых включены согласованно, а третья – встречечно, позволяет получить однофазное переменное напряжение с равномерно распределенной нагрузкой по фазам трехфазной сети и обеспечивает абсолютную симметрию нагрузки линии и трансформатора подстанции независимо от того, отбирает однофазную нагрузку один или несколько потребителей, или все потребители одновременно потребляют различную мощность.

Симметричная нагрузка 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. Это позволит обеспечить повышение надежности всех защитных мероприятий, так как в принципе защищает сеть от «отгорания» нулевого провода.



*Рис. 3. Устройство для симметричного распределения однофазной нагрузки*

Наличие у каждой из вторичных обмоток независимых от основных обмоток дополнительных витков позволяет получить 3 ступени регулирования напряжения вверх и, при необходимости, 3 – вниз, что повышает качество электроснабжения.

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

Питание потребителя через разделительный трансформатор обеспечивает гальваническую развязку потребителя от внешней мощной сети и повышает безопасность электроснабжения.

Симметричная нагрузка по фазам исключает перекос фаз, появление симметричных составляющих обратной последовательности и появление обратного крутящего момента у асинхронных машин.

Питание каждой однофазной обмотки одновременно от трех фаз позволяет получить одинаковый угол сдвига тока по всем фазам, снизить расходы на приборы учета потребления электрической энергии, повысить точность учета и упростить расчеты за электрическую энергию.

В этом случае появление тока в нулевом проводе свидетельствует либо об аварийной ситуации, либо о наличии у потребителя импульсной нагрузки (тоже «аварийная» ситуация).

**Заключение.** Поскольку подавляющее большинство электроснабжающего оборудования аналоговые устройства с большой перегрузочной способностью, обладающие уникальными эксплуатационными характеристиками, позволяющими автоматически отрабатывать изменения нагрузки, предлагаемые авторами пути повышения надежности электроснабжения не только снижают потери в распределительных сетях и электротравматизм, исключают перекосы фаз, перегрев и «отгорание» нулевого провода симметрированием работы трансформаторов трансформаторных подстанций, позволяя повысить нагрузки на оборудование электрических сетей, снизить потери в сетях, облегчить учет расходуемой электроэнергии и снизить опасность электротравматизма (прежде всего однофазных потребителей) из-за наличия гальванической развязки между мощными питающими сетями и маломощным потребителем и, в силу обратимости электрических машин, защищают потребителя от несимметрии напряжений по фазам даже при несимметрии напряжений по фазам питающей сети, исключая аварийность трехфазных асинхронных электрических машин и травматизм. Предлагаемые авторами решения 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



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов Н. В., Ларин В. С., Филиппов А. Е. О нормировании потерь и энергоэффективности распределительных трансформаторов // Энергетик. 2018. № 3. С. 13–17.
2. Косоухов Ф. Д., Петров В. Ф., Теремецкий М. Ю., Криштопа Н. Ю. Снижение потерь электроэнергии в сельских сетях 0,38 кВт при несимметричной нагрузке // Техника в сельском хозяйстве. 2013. № 5. С.14–17.
3. Косоухов Ф. Д., Филиппов А. О., Васильев Н. В., Борошин Б. Н. Симметрирование однофазных нагрузок в сельских электрических сетях // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2013. № 2. С. 9–13.
4. Анчарова Т. В., Ращевская М. А., Стебунова Е. Д. Электроснабжение и электро-оборудование зданий и сооружений. М., 2014. 416 с.
5. Попов Н. М. Электроснабжение. Рабочие режимы сетей 0,38...10 кВ. Кострома, 2010. 202 с.
6. Орлов П. С. Трансформаторы. Ч. II. Трехфазные силовые трансформаторы. Ярославль, 2006. 75 с.
7. Шагиморданов Д. Э. Разработка трехфазно-однофазной сети для электроснабжения сельских потребителей. Кострома, 2014. 20 с.
8. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М., 2014.
9. Методика определения народнохозяйственного ущерба от перерывов электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. М., 1987.
10. Кадыков Ю. М., Кадыкова О. Ю. Обеспечение надежности электроснабжения потребителей в сельской местности // Энергетик. 2016. № 3. С. 3–7.
11. Сергеенков Б. Н., Киселев В. М., Акимова В. А. Электрические машины. Трансформаторы. М., 1989. 352 с.
12. Яковлев Г. Н. Неотложные меры по снижению потерь электроэнергии у потребителя // Сб. материалов. Ярославль, 2012. С. 208–209.
13. Яшина Н. В. Целесообразность применения трансформаторов со сниженным энергопотреблением // Энергоэксперт. 2015. № 2. С. 4–6.
14. Курилин С. П. Развитие теории несимметричных режимов и энергетических процессов асинхронных двигателей сельскохозяйственных электроустановок. М.; Смоленск, 2005. 44 с.
15. Петъко В. Г., Садчиков А. В. Устройство защиты трехфазного электродвигателя от асимметрии питающего напряжения // Электротехника. 2003. № 10. С. 5–9.
16. Сердешнов А. Симметрирующее устройство для трансформаторов средство стабилизации напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ // Новости электротехники. 2005. № 3 (81). С. 15.
17. Таранов М. А., Корчагин П. Т. Устройство симметрирования неполнофазных режимов на линии 10 кВ для удаленных потребителей // Патент РФ № 2516461 H02 H7/092014 г.
18. Орлов П. С., Голдобина Л. А., Шкрабак В. С., Казиловка Н. Р., Орлов С. П., Парамонов С. А., Челышев К. А. Устройство для симметричного распределения однофазной нагрузки по фазам трехфазной сети. // Патент РФ № 2506676 H02J 3/00. Бюл. № 4. от 10.02.14.

## REFERENCES

1. Drozdov N. V., Larin V. S., Filippov A. E. About normalization of losses and energy efficiency of distribution transformers. Energetik = Powerman. 2018; 3: 13–17.
2. Kosoukhov F. D., Petrov V. F., Teremetskiy M. Yu., Krishtopa N. Yu. Reduction of electricity losses in rural networks by 0.38 kW with an asymmetric load. Tekhnika v sel'skom khozyaystve = Technics in agriculture. 2013; 5: P. 14–17.
3. Kosoukhov F. D., Filippov A. O., Vasiliev N. V., Boroshnin B. N. Balancing of single-phase loads in rural electrical networks. Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva = Mechanization and electrification of agriculture. 2013; 2: 9–13.
4. Ancharova T. V., Rashevskaya M. A., Stebunova E. D. Power supply and electrical equipment of buildings and structures. Moscow; 2014.416 p.
5. Popov N. M. Power supply. Operating modes of networks 0.38 ... 10 kV. Kostroma; 2010. 202 p.
6. Orlov P. S. Transformers. Part II. Three-phase power transformers. Yaroslavl; 2006.75 p.
7. Shagimordanov D. E. Development of a three-phase-single-phase network for power supply of rural consumers. Kostroma; 2014.20 p.
8. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. Moscow; 2014.
9. Methodology for determining the national economic damage from interruptions in power supply to agricultural consumers. Moscow; 1987.
10. Kadykov Yu. M., Kadykova O. Yu. Ensuring the reliability of power supply to consumers in rural areas. Energetik = Powerman. 2016; 3: 3–7.
11. Sergeenkov B. N., Kiselev V. M., Akimova V. A. Electric machines. Transfomators. Moscow; 1989. 352 p.
12. Yakovlev G. N. Urgent measures to reduce electricity losses at the consumer. Yaroslavl; 2012: 208–209.
13. Yashina N. V. Feasibility of using transformers with reduced energy consumption. Energoexpert. 2015;2:4–6.
14. Kurilin S. P. Development of the theory of asymmetric modes and energy processes of asynchronous motors of agricultural electrical installations. Moscow; Smolensk; 2005. 44 p.
15. Petko V. G., Sadchikov A. V. Device for protecting a three-phase electric motor from the asymmetry of the supply voltage. Elektrotekhnika = Electrical engineering. 2003; 10: 5–9.
16. Serdeshnov A. Balancing device for transformers – means of voltage stabilization and reduction of losses in 0.4 kV networks. Novosti elektrotekhniki = News of electrical engineering. 2005; 3 (81): 1–5.
17. Taranov M. A., Korchagin P. T. A device for balancing half-phase modes on a 10 kV line for remote consumers // RF Patent No. 2516461 H02 H7 / 092014
18. Orlov P. S., Goldobina L. A., Shkrabak V. S., Kazilovka N. R., Orlov S. P., Paramonov S. A., Chelyshev K. A. Phase load by phases of a three-phase network. // RF Patent No. 2506676 H02J 3/00. Bul. No. 4. dated 02/10/14.

Статья поступила в редакцию 02.08.2021; одобрена после рецензирования 17.08.2021; принята к публикации 25.08.2021.  
The article was submitted 02.08.2021; approved after reviewing 17.08.2021; accepted for publication 25.08.2021.

