

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИММЕТРИРОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

В.В. Романова, С.В. Хромов, В.Н. Гонин

Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

Рассмотрены основные аспекты разработки методики расчета экономической эффективности внедрения технических средств симметрирования в электротехнический комплекс с электродвигательной нагрузкой. Несимметрия напряжений наблюдается в электрических сетях всех классов напряжения. На основании анализа проведенных исследований несимметрии напряжений в действующих сетях 0,4; 6; 35 кВ энергосистемы Забайкальского края установлено, что нарушения требований межгосударственного стандарта по качеству электрической энергии ГОСТ 32144–2013 имеют массовый и систематический характер. Зафиксирован достаточно высокий уровень несимметрии напряжений в исследуемых электрических сетях. Несимметрия напряжений оказывает негативные последствия электромагнитного и технологического характера (дополнительные потери мощности, ускоренное старение изоляции, преждевременный выход из строя электрооборудования). В связи с этим важное значение приобретает минимизация уровней несимметрии напряжений, помимо этого, оценка экономической эффективности внедрения технических средств симметрирования в электротехнический комплекс.

Разработанная методика имеет комплексный характер, в которой учитываются составляющие экономического эффекта, критерии оценки эффекта от их внедрения и одновременно вариабельность их прикладного использования. Методика расчета предназначена для принятия и обоснования решений о применении средств симметрирования в электротехническом комплексе с электродвигательной нагрузкой. Областью применения методики является проведение технико-экономической оценки эффективности внедрения средств симметрирования для нормализации напряжения в электрических сетях, повышения эксплуатационной надежности асинхронных электродвигателей. Методика расчета апробирована на примере участка системы электроснабжения с. Таптугары Могочинского района Забайкальского края. Проведен анализ и обсуждение полученных результатов исследования, сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: качество электрической энергии, несимметрия напряжений, эксплуатационная надежность асинхронных электродвигателей, симметрирующее устройство, экономический эффект.

Введение

В электротехнических комплексах (ЭТК) и системах промышленного, транспортного, сельскохозяйственного, бытового и специального назначения широко используется асинхронный электропривод с большим диапазоном номинальных мощностей электродвигателей. Многолетний опыт эксплуатации асинхронных электродвигателей (АД) на предприятиях показывает их высокую повреждаемость, которая ежегодно достигает 45 % и более от общего числа повреждений электрооборудования [1]. Высокая аварийность АД обусловлена особенностями их эксплуатации. К специфическим условиям следует отнести низкое качество напряжения в сети, в частности, несимметрию питающего напряжения [2, 3]. Несимметрия питающего напряжения оказывает негативное воздействие на АД, снижает эксплуатационную надежность и увеличивает опасность возникновения отказов электродвигателей. Так, срок службы полностью загруженного асинхронного двигателя, работающего при несимметрии напряжения 4 %, сокращается в 2 раза. При несимметрии напряжения 5 % располагаемая мощность двигателя уменьшается

на 5–10 % [4, 5]. Из-за нарушения изоляции выйдут из строя около 75 % АД, а экономический ущерб от повреждения одного электродвигателя достигает нескольких десятков тысяч рублей [6].

Снижение несимметрии напряжений достигается путем применения различных способов и технических средств, позволяющих восстановить симметрию напряжений в электрической сети. Согласно [7, 8] разработаны разнообразные способы и технические средства симметрирования режима работы электрических сетей, различающиеся по сложности, эффективности, стоимости, принципу действия и технической доступности для разных категорий потребителей. Выбор того или иного средства симметрирования производится прежде всего в зависимости от характера несимметрии в сети на основании критического анализа существующих технических средств защиты электродвигателей с целью максимальной симметрирующей способности, в конечном итоге решение об использовании средств симметрирования принимается на основании величины экономического эффекта от внедрения средств и способов симметрирования.

1. Постановка задачи

Основной задачей работы является повышение качества электрической энергии (КЭЭ) со стороны электропотребителей, в частности, организация технических мероприятий по снижению несимметрии напряжений на трехфазных электроприемниках.

Объектом исследования является ЭТК, в состав которого входят приводные низковольтные АД, эксплуатируемые в распределительных сетях электроснабжения 0,4 кВ.

Для обоснования внедрения технических средств симметрирования, выбора мест их расположения в ЭТК с электродвигательной нагрузкой целесообразно разработать методику расчета экономической эффективности внедрения средств симметрирования в электротехнический комплекс. Стоит отметить, что на сегодняшний день, несмотря на значительные успехи в данной области исследования, не существует универсально-адаптированного метода экономической оценки эффективности внедрения технических средств симметрирования. Существующие методики оценки экономической эффективности реализуют точечную задачу. Так, например, в работах авторов [9–13] решена проблема минимизации несимметрии сети за счет снижения дополнительных потерь мощности, в работах [14–20] достаточно широко освещены вопросы исследования и разработок эффективных методов оценки несимметрии напряжений, на основании которых реализованы мероприятия повышения эксплуатационной надежности АД. Именно поэтому методика расчета экономической эффективности внедрения технических средств симметрирования должна иметь комплексный характер, где учитываются составляющие экономического эффекта, критерии оценки эффекта от их внедрения и одновременно вариативность их прикладного использования. В комплексе все приведенные составные части сложно оценить одним количественным показателем. Очевидно, комплексный характер методики должен проявляться и при выборе показателей для оценки экономической эффективности внедрения технических средств симметрирования.

Предлагаемый подход заключается в комплексном использовании количественных показателей расчета, создании на их основе единой методики, нацеленной на максимальную экономическую эффективность принятых решений, ориентированных на инженерную практику, и реализацию их в программно-вычислительных комплексах. Сказанное выше определяет актуальность проблемы и реализации предлагаемой методики расчета.

2. Материалы и методы исследования

Методика расчета предназначена для принятия и обоснования решений о применении средств симметрирования в электротехническом комплексе с электродвигательной нагрузкой. Областью

применения методики является проведение технико-экономической оценки эффективности внедрения средств симметрирования для нормализации напряжения в электрических сетях, повышения эксплуатационной надежности асинхронных электродвигателей.

Экономический эффект от внедрения технических средств симметрирования в ЭТК с электродвигательной нагрузкой состоит из составляющих:

- 1) снижения дополнительных потерь мощности;
- 2) изменения срока службы электрооборудования;
- 3) избавления от штрафов за плохое КЭЭ (надбавки и скидки);
- 4) снижения ущерба от повреждения и остановки технологического оборудования.

Рассмотрим расчет экономической эффективности установки средств симметрирования на примере участка системы электроснабжения с. Таптугары Могочинского района Забайкальского края (рис. 1).

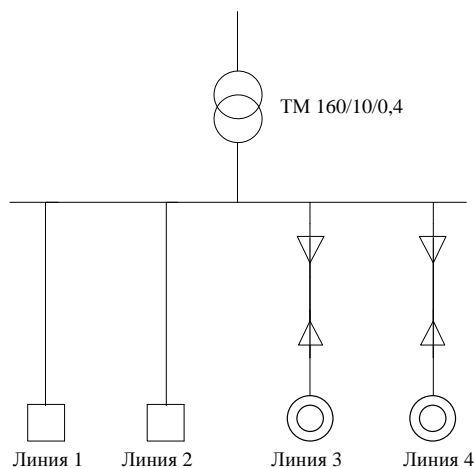


Рис. 1. Схема участка системы электроснабжения с. Таптугары Могочинского района Забайкальского края

При выполнении данной работы использована следующая исходная информация:

- 1) результаты обработки данных показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в узлах сети 0,4 кВ Могочинского района Забайкальского края;
- 2) конфигурация участка системы электроснабжения с. Таптугары, характеристика электропотребителей.

Инструментальное обследование распределительных электрических сетей 0,4 кВ Могочинского района Забайкальского края осуществлялось в соответствии с действующим ГОСТ 30804.4.30–2013 [21] сертифицированным прибором «Энергомонитор 3.3Т».

Проведенные исследования ПКЭ характеризуют недопустимый уровень коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}), превышающий нормируемое ГОСТ 32144–2013 [22] значение, представляющий

реальную опасность при эксплуатации электрооборудования, вследствие чего возникает необходимость применения специальных мер по устранению несимметрии напряжений.

Исходная информация об участке системы электроснабжения представлена в табл. 1.

Расчет экономической эффективности внедрения средств симметрирования рассматриваемого объекта выполнен с использованием «Програм-

мы определения оптимального места установки средств симметрирования» [23], официально зарегистрированной, протестированной и апробированной на реально функционирующих системах электроснабжения 0,4 кВ Забайкальского края.

Алгоритм программы основан на методике расчета СЭС с учетом использования средств симметрирования и мест их установки [24]. Обобщенная блок-схема алгоритма приведена на рис. 2.

Таблица 1

Исходные данные участка сети с. Таптугары

Параметр	Линия 1	Линия 2	Линия 3	Линия 4	ТП
Мощность, кВА	30,4	49,4	20,9	25	160
Ток, А	80	130	55	65,7	330,7
Марка провода (кабеля)	АС-25	АС-25	АВВШв 4*50	СИП 4*25	
Длина линии, м	350	50	70	150	
Количество и мощность АД	–	–	а) 2 АД 4А132S4Y3 $P_n = 7,5$ кВт, б) 1 АД $P_n = 3$ кВт, в) 1 АД $P_n = 1,4$ кВт	2 АД АИ132М4 $P_n = 11$ кВт	

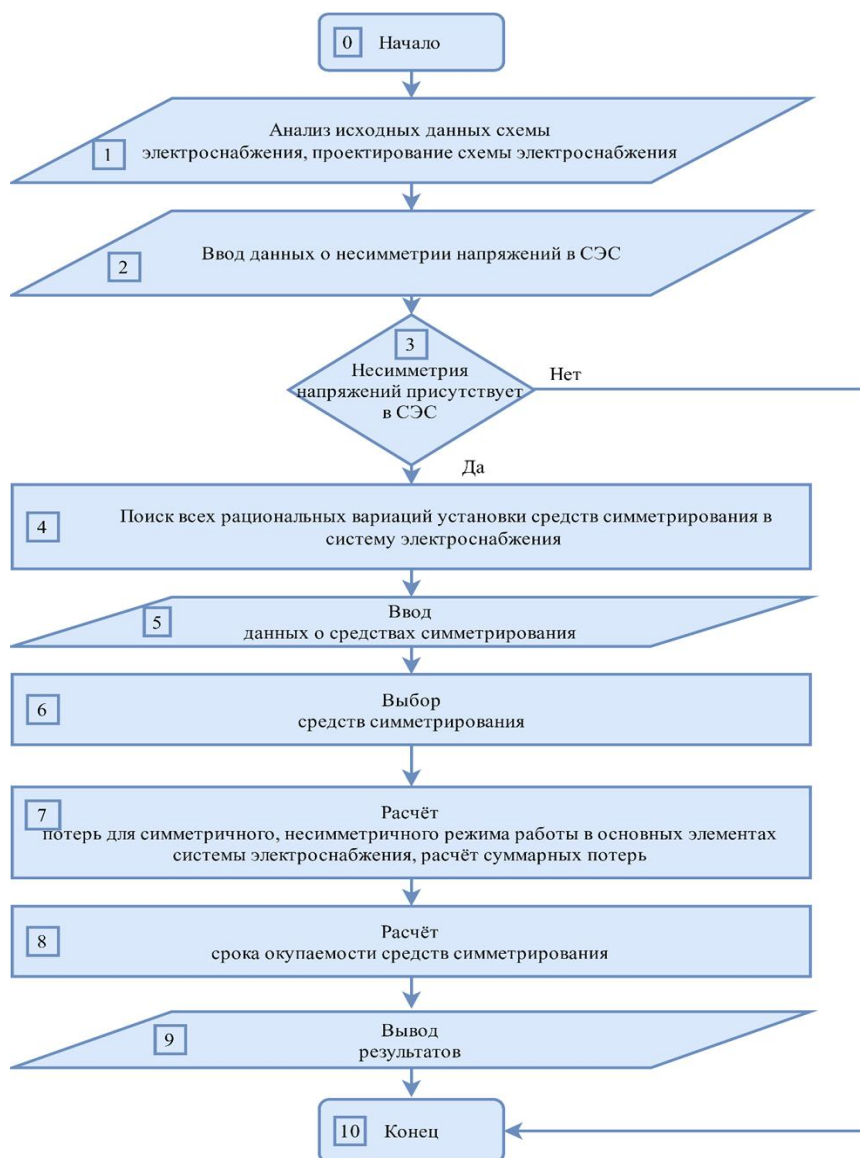


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета системы электроснабжения с учетом средств симметрирования и мест их установки

Программа реализована при помощи языка программирования C# в среде программирования Microsoft Visual Studio 2012, с использованием встраиваемой кросс платформенной базы данных SQLite [25–27].

Программа обеспечивает отрисовку принципиальных схем ЭТК 0,4 кВ с возможными средствами симметрирования, осуществляет расстановку средств симметрирования в ЭТК при топологии сети любой сложности. Предусматривает расчет нескольких вариантов симметрирования и выбор варианта с наименьшим сроком окупаемости. Принятие решения о применении средств симметрирования, их параметров и мест установки основывается на сопоставлении технико-экономических показателей альтернативных вариантов.

Изменяя параметры расчетной схемы (средства симметрирования, их количество), можно подобрать их таким образом, чтобы во всем ЭТК обеспечивалась надежная работа АД. Мощность, число средств симметрирования выбирается с учетом особенностей конкретной сети.

3. Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим составляющие экономического эффекта от внедрения технических средств симметрирования.

Составляющая, обусловленная снижением дополнительных потерь мощности

В подавляющем большинстве потери электроэнергии в распределительных сетях электроснабжения 0,4 кВ приходятся на линии электропередачи (ЛЭП), трансформаторы, асинхронные электродвигатели. Именно поэтому в практических расчетах учитывают потери электроэнергии только в этих элементах сети [28]. При внедрении дополнительного элемента в систему электроснабжения целесообразно учесть потери электроэнергии в

этом элементе. Таким образом, в рамках данной работы помимо потерь в основных элементах системы электроснабжения необходимо рассмотреть потери в средствах симметрирования.

Исследуемая система электроснабжения (см. рис. 1) содержит в своем составе: асинхронные электродвигатели, ЛЭП, трансформатор. Произведем расчет дополнительных потерь мощности для несимметричного, симметричного режимов работы в элементах системы электроснабжения с использованием прикладной программы [23]. Поскольку несимметрия напряжения в сети, как правило, нестационарна, соответственно, в методике расчета величина коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) имеет нестационарный характер. Кроме того, в расчете учитывается изменение графика электрических нагрузок во времени.

В данной работе программа является инструментом реализации методики расчета экономической эффективности внедрения технических средств симметрирования в ЭТК с электродвигательной нагрузкой.

Результаты промежуточных расчетов сведены в табл. 2.

Относительное снижение общих потерь мощности за счет внедрения средств симметрирования составляет:

$$\varepsilon = 100 - \frac{\Delta P_{\text{симм}} + \Delta P_{\text{доп}}}{\Delta P_{\text{симм}} + \Delta P_{\text{допб}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

$$\varepsilon = 100 - \frac{8,67 + 3,5}{8,67 + 11,716} \cdot 100 \% = 40,3 \%$$

То есть потери мощности за счет снижения несимметрии напряжений уменьшились на 40,3 %.

Годовой экономический эффект от снижения потерь в ЭТК:

$$\Delta W_{\text{доп}} = (\sum_{j=1}^n (\sum_{j=1}^n t_j \cdot T_j \cdot \Delta P_{\text{допб}j} - \sum_{j=1}^n \Delta P_{\text{доп}j} \cdot t_j \cdot T_j)) \cdot C, \quad (2)$$

где $\Delta W_{\text{доп}}$ – экономический эффект, руб./год;

Таблица 2

Результаты расчета дополнительных потерь мощности в элементах ЭТК

Дополнительные потери мощности в элементах ЭТК без средств симметрирования			Дополнительные потери мощности в элементах ЭТК после внедрения средств симметрирования
Название элемента	Величина постоянных потерь в элементе ЭТК, кВт	Величина дополнительных потерь в элементе ЭТК, кВт	Величина дополнительных потерь в элементе ЭТК, кВт
ЛЭП1	2,85	0,02852	0,0285
ЛЭП2	0,34	0,00341	0,0034
ЛЭП3	0,14	0,00143	0,0014
ЛЭП4	0,53	0,00531	0,0053
Силовой трансформатор	4,79	3,39	0,14
Симметрирующий трансформатор	–	–	1
АД1	–	1,67	0,42
АД2	–	1,67	0,42
АД3	–	2,45	0,7
АД4	–	2,45	0,7
Суммарные потери	8,67	11,716	3,5

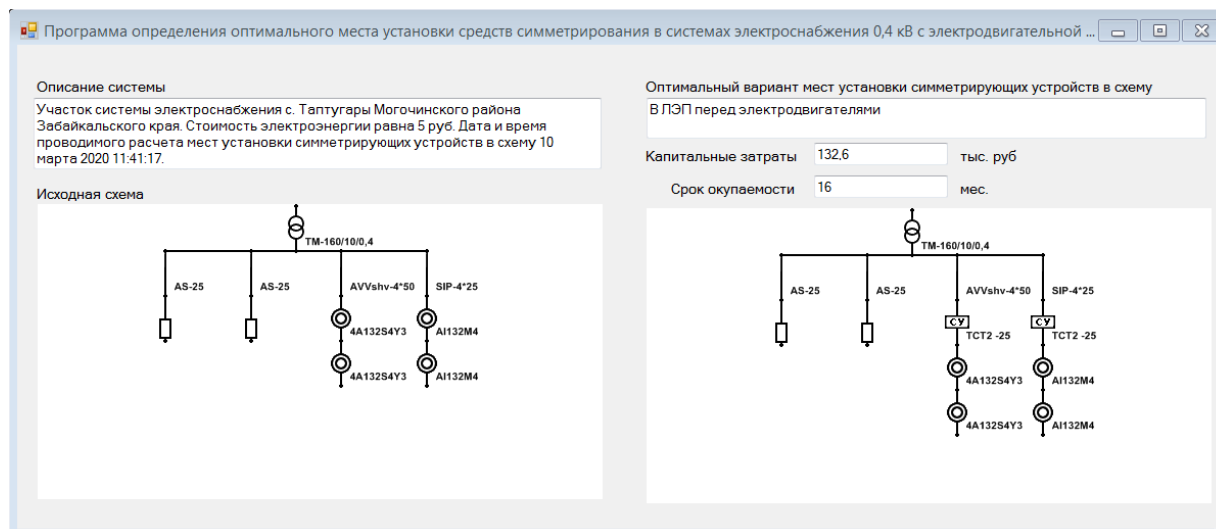


Рис. 3. Интерфейс программы: окно вывода результатов расчета

t_j – время работы электроприемника с заданной нагрузкой и определенной величиной несимметрии в день, ч;

T_j – дни работы с заданной нагрузкой и определенной величиной несимметрии в год, ед.;

$\Delta P_{\text{доп}j}$ – дополнительные потери без средств симметрирования, кВт;

$\Delta P_{\text{доп}j}$ – дополнительные потери со средством симметрирования, кВт;

C – стоимость электроэнергии, руб.

$$\Delta W_{\text{доп}} = (11,7163 \cdot 8 \cdot 218 - 3,5 \cdot 8 \cdot 218) \cdot 5 = 71\,646 \text{ руб./год.}$$

Из этого следует, что экономический эффект от снижения потерь мощности составил 71 646 руб./год.

Опираясь на результаты экспериментальных исследований ПКЭ, данных о величине потерь мощности в элементах исследуемой СЭС, произведем выбор средств симметрирования и размещение данных устройств в ЭТК. Итоговая информация результатов расчета представлена на рис. 3.

В результате применения программы выявлена необходимость установки симметрирующих трансформаторов для промышленных потребителей в рассматриваемой схеме (см. рис. 1). На линии 1 и 2 установка средств симметрирования не требуется в силу присутствия в них только однофазной нагрузки. Определено наиболее экономически целесообразное размещение средств симметрирования в ЭТК, исходя из срока окупаемости мероприятий, направленных на снижение несимметрии напряжений.

Внедряя средства симметрирования в ЭТК, повысили надежность работы АД, но при этом степень повышения надежности в распределительной сети за счет последовательного включения в сеть дополнительного элемента незначительно снизилась, так как коэффициент надежности СС по данным производителей [29, 30] составляет 0,8–0,95.

Составляющая, обусловленная увеличением срока службы АД

Как известно, показатели надежности устанавливаются в технических условиях на конкретный типоразмер двигателей. Показатели надежности и долговечности для асинхронных двигателей серии 4А, АИ [31]:

– средний срок службы – более 15 лет при наработке 40 000 ч;

– средний срок службы до первого капитального ремонта – 8 лет при наработке 20 000 ч, вероятность безотказной работы – более 0,9 за 10 000 ч.

Срок службы АД в первую очередь определяется сроком службы изоляции обмоток электродвигателя, необходимо рассмотреть изменение этого параметра.

Продолжительность жизни изоляции обмоток АД вследствие несинусоидальности и несимметрии питающего напряжения согласно методике расчета А.К. Шидловского [32]:

$$z = e^{[-280(1,55 \cdot K_2 U^2) + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{\sqrt{v}}]} \quad (3)$$

Так как в данном случае интересует только несимметрия напряжений и её нестационарный характер, необходимо ввести интегральный показатель, который позволит учесть этот факт, тогда выражение примет вид:

$$z = \int_0^{+\infty} e^{[-280(1,55 \cdot (K_2 U^2))]} \quad (4)$$

при условии $K_{2U} \geq K_{2U_{\text{доп}}}$.

При применении интегрального показателя будут учтены изменения несимметрии напряжений с течением времени и вызванное этим снижение срока службы электродвигателя. Принимаем расчетный срок службы АД по наработке $T = 40\,000$ ч, считаем, что сокращением срока службы АД до достижения допустимой величины $K_{2U_{\text{доп}}}$ можно пренебречь. Допустимая величина $K_{2U_{\text{доп}}}$ АД индивидуальна для каждого типоразмера электродвигателя. Безаварийная эксплуатация АД при длитель-

ном режиме работы возможна при $K_{2U_{доп}}$ не более 1,3 % [20].

Соответственно, снижение срока службы АД начинается при достижении допустимой величины $K_{2U_{доп}}$.

Рассмотрим продолжительность жизни изоляции обмоток АД. В качестве примера выбраны АД с короткозамкнутым ротором серии 4А (4А132S4Y3 с $P_n = 7,5$ кВт; 4А250S4Y3 с $P_n = 75$ кВт; 4А315M4Y3 с $P_n = 200$ кВт) и серии АИ (АИР132S4 с $P_n = 7,5$ кВт; АИР250S4 с $P_n = 75$ кВт; АИР355M6 с $P_n = 200$ кВт).

Продолжительность жизни изоляции обмоток АД серии АИ $P_n = 75$ кВт при нормативном сроке службы 40 000 ч при различных значениях K_{2U} :

При $K_{2U} = 2$ %, $z = 39\ 688$ ч,

При $K_{2U} = 5$ %, $z = 24\ 000$ ч.

Основной вид изменения срока службы АД от K_{2U} представлен на рис. 4.

Проведенный анализ полученных результатов (см. рис. 4) показал, что с увеличением K_{2U} , происходит снижение срока службы АД разного типа-размера индивидуально. Так, например, при $K_{2U} = 3$ % срок службы АД серии АИ $P_n = 75$ кВт снижается на 1500 ч относительно номинального срока службы. АД большей мощности менее подвержены влиянию несимметрии питающего напряжения.

Принимая расчетный срок службы АД по наработке $T = 40\ 000$ ч, при сроке службы АД $t = 15$ лет, получим число часов наработки АД в год:

$$t_1 = 40\ 000 / 15 = 2666 \text{ ч}$$

При $K_{2U} = 5$ %, $z = 24\ 000$ ч, соответственно, разница между нормативным и расчетным сроком службы составляет:

$$T_1 = T - z,$$

$$T_1 = 40\ 000 - 24\ 000 = 16\ 000 \text{ ч.}$$

Снижение срока службы в годах составляет:

$$T_2 = T_1 / t_1,$$

$$T_2 = 16\ 000 / 2666 = 6 \text{ лет} - \text{снижение срока при}$$

$$K_{2U} = 5 \text{ \%}.$$

Из этого следует, что продление срока службы АД за счет повышения качества питающего напряжения составило 6 лет.

При определении экономического эффекта от увеличения срока службы АД необходимо учесть количество капитальных ремонтов до достижения нормативного срока службы. Капитальный ремонт необходим любой электрической машине за время нормативного срока службы; для АД, работающего при номинальных параметрах, количество капитальных ремонтов составляет один раз за срок его службы [31].

Таким образом, экономический эффект от продления срока службы АД составляет:

$$\Delta W_{\text{ссад}} = C_{\text{кр}} \cdot N, \quad (5)$$

где $C_{\text{кр}}$ – стоимость капитального ремонта АД, принимаем из справочных данных [33];

N – количество дополнительных капитальных ремонтов;

20 000 ч – межремонтный интервал при одном нормативном капитальном ремонте и общей наработке 40 000 ч. Следовательно, количество дополнительных капитальных ремонтов $N_{\text{норм}} = 1$.

Межремонтный интервал при снижении срока службы на 16 000 ч для рассматриваемого объекта составляет:

$$T_{\text{меж}} = (40\ 000 - 16\ 000) / 2 = 12\ 000 \text{ ч.}$$

Поэтому, для достижения общей наработки в 40 000 ч необходимо следующее количество капитальных ремонтов:

$$N_{\text{кр}} = 40\ 000 / 12\ 000 = 3,33 \text{ ремонта.}$$

Целочисленно принимаем общее количество капитальных ремонтов, равное трем, таким образом, количество дополнительных капитальных ремонтов:

$$N = N_{\text{кр}} - N_{\text{норм}} = 3 - 1 = 2.$$

Участок системы электроснабжения с. Таптугары содержит в своем составе 4 асинхронных

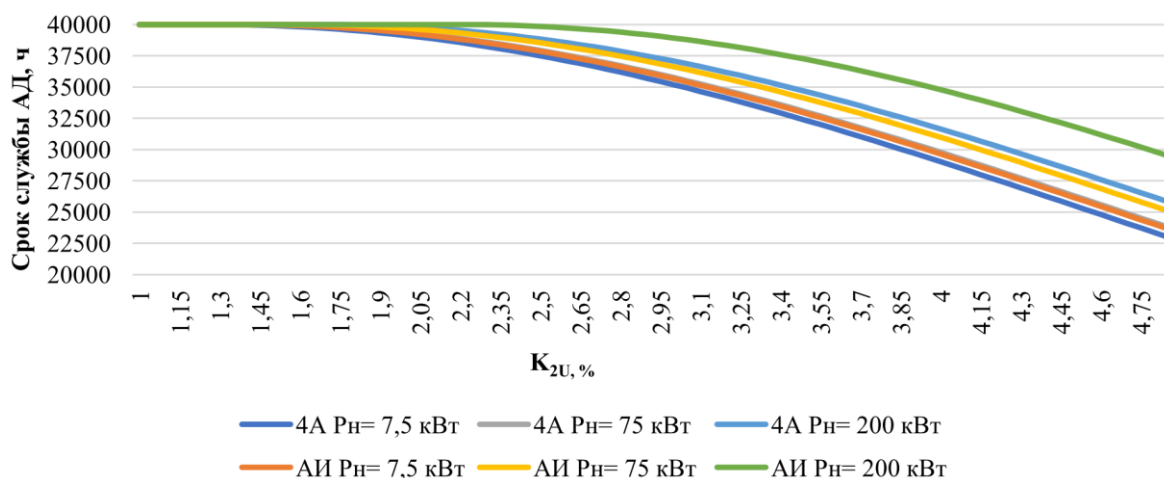


Рис. 4. График изменения срока службы АД от K_{2U}

электродвигателя, необходимо определить экономический эффект от увеличения срока службы каждого из АД.

Экономический эффект от увеличения срока службы АД марки 4А132S4Y3 $P_n = 7,5$ кВт составляет:

$$\Delta W_{\text{ссад}} = 8568,82 \cdot 2 = 17\,137,64 \text{ руб.}$$

Расчет аналогичен для остальных АД, присутствующих в ЭТК. Таким образом, годовой экономический эффект от увеличения срока службы всех АД в ЭТК составляет:

$$\Delta W_{\text{сс}} = \sum \frac{\Delta W_{\text{ссад}}}{\text{нормативный срок службы АД}} = \\ = \frac{17\,137,64 \cdot 4}{15} = 4570 \text{ руб./год.}$$

Фактический экономический эффект от увеличения срока службы возникает только из-за увеличения межремонтных интервалов. Так, при преобладании несимметрии в сети межремонтный интервал составил 12 000 ч, а при отсутствии – 20 000 ч. Следовательно, уменьшилось количество дополнительных капитальных ремонтов АД.

Составляющая, обусловленная установлением скидок-надбавок к тарифу на электроэнергию

Отклонения качества электрической энергии оказывает существенное влияние на работу электроприемников. Ухудшение КЭЭ приводит к ущербу, который понесут потребители и сам поставщик электроэнергии [34].

На сегодняшний момент в России принята нормативно-правовая база, которая обязывает относить вопрос о качестве поставляемой электроэнергии к элементам товарно-денежных отношений. Согласно данным документам, в случае, когда поставщик предоставляет некачественную электроэнергию, потребитель должен рассчитывать величину нанесенного ущерба и требовать возмещения его поставщиком (ст. 547 ГК РФ). Однако если он уже потребил данную электроэнергию, то необходимо ее оплатить по меньшему тарифу (п. 2. ст. 542 ГК РФ).

Виновник нарушения КЭЭ определяется в соответствии с «Правилами применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии» [35].

Значение надбавки зависит от величины искажения КЭЭ составляет от 0,2 до 10 % тарифа на электроэнергию [36].

Оплата по тарифу с надбавкой за КЭЭ производится за весь объем электрической энергии, отпущенной (потребленной) в расчетный период. Если в нарушении виновна энергоснабжающая организация, штрафная санкция реализуется в виде скидки с тарифа, если виновен потребитель – в виде надбавки [36, 37].

Определим величину экономического эффекта скидок-надбавок к тарифу на электроэнергию для рассматриваемого объекта.

В данном рассматриваем случае искажение КЭЭ возникает в результате специфики работы Забайкальской энергосистемы, преобладания несимметричных режимов работы сетей. Соответственно, экономическая ответственность поставщика основана на установлении скидки к тарифу на электроэнергию.

Допустим, минимальная скидка на тариф составит 0,5 % от тарифа в 5 рублей, то годовой экономический эффект составит:

$$\Delta W_n = 5864 \text{ руб./год.}$$

Из этого следует, что экономический эффект от скидки к тарифу за электроэнергию составил 5864 руб./год.

Составляющая, обусловленная снижением ущерба от повреждения и остановки технологического оборудования

Согласно [38] ущерб от повреждения и остановки технологического оборудования составляет 2 % от стоимости произведенной продукции, тогда:

$$\Delta W_{\text{ущ}} = k_{\text{ущ}} \cdot \text{СП}, \quad (6)$$

где $k_{\text{ущ}}$ – коэффициент ущерба от повреждения и остановки технологического оборудования, %;

СП – стоимость произведенной продукции за год, руб./год.

Принимаем СП = 1800000 руб./год согласно отчетной документации предприятий [39].

$$\Delta W_{\text{ущ}} = 0,02 \cdot 1\,800\,000 = 36\,000 \text{ руб./год.}$$

В итоге получаем общий экономический эффект от внедрения средств симметрирования:

$$\Delta W_{\text{общ}} = \Delta W_{\text{доп}} + \Delta W_{\text{сс}} + \Delta W_n + \Delta W_{\text{ущ}}, \quad (7)$$

где $\Delta W_{\text{доп}}$ – экономический эффект от снижения потерь мощности в СЭС, руб./год;

$\Delta W_{\text{сс}}$ – экономический эффект от увеличения срока службы всех АД, находящихся в СЭС, руб./год;

ΔW_n – скидка-надбавка за тариф для рассматриваемого объекта, руб./год;

$\Delta W_{\text{ущ}}$ – экономический эффект от снижения ущерба от повреждения и остановки технологического оборудования, руб./год.

$$\Delta W_{\text{общ}} = 2310 + 71\,646 + 5864 + 36\,000 = \\ = 115\,820 \text{ руб./год.}$$

Расчет срока окупаемости выполнен с применением динамического метода расчета [39].

Срок окупаемости определим по следующей формуле:

$$DPP = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta W_{\text{общ}} - \text{ЭЗ}}{(1+D)^{it}} \geq \text{КЗ}, \quad (8)$$

где DPP – срок окупаемости, год;

КЗ – капитальные затраты на приобретение и монтаж средств симметрирования, руб.;

ЭЗ – затраты на эксплуатацию средств симметрирования, руб./год;

D – норма дисконта, %;

it – число отчетных периодов, ед.;

$\Delta W_{\text{общ}}$ – экономический эффект от внедрения средств симметрирования, руб./год.

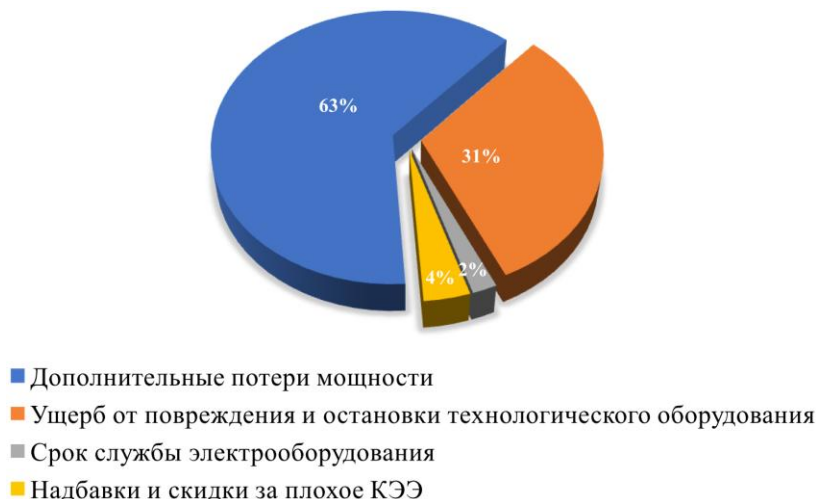


Рис. 5. Структура общего экономического эффекта от внедрения мероприятий по симметрированию

$$DPP = \frac{115820 - 5000}{(1 + 0,1)^{16}} \geq 132\ 600 \text{ руб.}$$

$$DPP = 1,3 \text{ г} = 16 \text{ мес.}$$

Анализ работ [40, 41] показал, что на сегодняшний день существует несколько основных методов расчета, позволяющих на практике оценить срок окупаемости внедренного электрооборудования. В данной работе использован динамический метод в связи со сроком окупаемости, составляющим более года. В случае, если срок окупаемости составляет менее года, применим статический метод расчета.

Наибольшее влияние на срок окупаемости мероприятий по симметрированию напряжений оказывают стоимость электроэнергии и размер штрафа за некачественную электроэнергию по причине широкого диапазона колебаний значений данных величин. Так, например, при повышении стоимости электроэнергии в 3 раза от первоначальной величины срок окупаемости уменьшится в 2,82 раза, а при повышении штрафа в пять раз от исходной величины срок окупаемости изменится в 1,1 раза.

Анализ ситуации в правовом регулировании отношений сторон о соблюдении требований к качеству поставляемой энергии [34] позволяет сделать вывод, что на сегодняшний день отсутствуют утвержденные методы (методики) определения размера гражданско-правовой ответственности за нарушение требований к КЭЭ в денежном выражении. Именно поэтому основной определяющей величиной эффективности внедрения средств симметрирования является величина тарифа за электроэнергию.

Комплексный характер методики основан на расчете каждой составляющей эффекта. Соответственно, определить экономическую эффективность возможно только рассчитав все составляющие.

Процентное соотношение экономического эффекта от внедрения технических решений по симметрированию для рассматриваемого участка системы электроснабжения с. Таптугары Могочинского района Забайкальского края представлено на рис. 5.

Представленное выше процентное соотношение общего экономического эффекта (см. рис. 5) наглядно иллюстрирует, что доля дополнительных потерь мощности и ущерба от повреждения и остановки технологического оборудования при определении экономической эффективности средств симметрирования настолько велика, что остальными составляющими эффекта можно пренебречь. Величина доли дополнительных потерь будет иметь определяющую роль до тех пор, пока величины штрафов за нарушение КЭЭ не возрастут.

Таким образом, с использованием разработанной методики расчета экономической эффективности внедрения технических средств симметрирования в ЭТК с электродвигательной нагрузкой проведено экономическое обоснование использования средств симметрирования на примере участка системы электроснабжения с. Таптугары Могочинского района Забайкальского края. При этом получены следующие количественные показатели: годовой экономический эффект от внедрения средств симметрирования составил 115 тыс. руб., срок окупаемости мероприятий – 16 месяцев, продление срока службы АД за счет повышения качества питающего напряжения составило 6 лет.

4. Заключение

В заключение хотелось бы отметить, что реализация мероприятий, обеспечивающих длительную эксплуатацию электродвигателей в ЭТК предприятий с минимальной вероятностью их безотказной работы, невозможна без экономической оценки и обоснования эффективности внедрения принятых технических решений.

Именно поэтому расчеты, произведенные на основании методики, позволяют сделать с высокой степенью достоверности вывод о целесообразности применения средств симметрирования на конкретных объектах и обеспечить: эффективное симметрирование напряжения в электрической сети, уменьшение затрат на реновацию, планово-предупредительные и восстановительные ремонты электрооборудования, сокращение дополнитель-

ных потерь мощности, увеличение срока службы электрооборудования.

Разработанная методика имеет комплексный характер, в ней учтены составляющие экономического эффекта внедрения средств симметрирования, вместе с тем методика универсальна, возможно ее прикладное применение на участке ЭТК любой конфигурации и сложности.

Литература

1. Кузнецов, Н.Л. Надёжность электрических машин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
2. Надёжность работы электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии / И.В. Жезленко, Ю.Л. Саенко, А.В. Горпинич, И.А. Швецова // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Маріуполь: Изд-во ПДТУ, 2005. – № 15, ч. 2. – С. 25–29.
3. Voltage unbalance emission assessment: sources of contribution and their ranking / U. Jayatunga, S. Perera, P. Ciufo, A. Agalgaonkar // Australasian Universities Power Engineering Conference. – 2013. – P. 1–6. DOI: 10.1109/auprec.2013.6725398
4. Пинчук, О.Г. Энергетические показатели асинхронного двигателя при различных параметрах несимметрии питающего напряжения / О.Г. Пинчук // Електротехніка і енергетика. Наукові праці ДонНТУ. – 2008. – № 8 (140). – С. 201–205.
5. Study of voltage unbalance conditions based on the behavior of the complex voltage unbalance factor / A.L. Filho, Diogo Garcia, Francisco Nascimento, Jorge Cormane // IEEE/PES Transmission and distribution conference and exposition: Latin America, 2010. – P. 184–189. DOI: 10.1109/tdc-la.2010.5762880
6. Самойленко, И.А. Классификация и систематизация видов ущерба от низкого качества электроэнергии / И.А. Самойленко // Экономика Крыма. – 2010. – № 2. – С. 109–115.
7. Pillay, P. Definitions of voltage unbalance / P. Pillay, M. Manuaga // IEEE Power Eng. Rev. – 2001. – Vol. 21 (5). – P. 1–4.
8. Карташев, И.И. Управление качеством электроэнергии: учебное пособие / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов; под ред. Ю.В. Шарова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 347 с.
9. Дед, А.В. Оценка дополнительных потерь мощности от несимметрии напряжений и токов в элементах систем электроснабжения / А.В. Дед, А.В. Паршукова, Н.А. Халитов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. Научный журнал. – М.: Изд-во «Академия естествознания», 2015. – № 10, ч. 3. – С. 421–425.
10. Дед, А.В. Методы расчетов потерь, обусловленных несимметрией токов и напряжений / А.В. Дед, Л.Ю. Шелехина, А.В. Симаков // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2017. – № 1. – С. 183–188.
11. Дулепов, Д.Е. Снижение потерь электрической энергии при несимметричных режимах в сельских распределительных электрических сетях 0,38 кВ / Д.Е. Дулепов, Т.Е. Кондраненкова // Дальневосточный аграрный вестник. – 2017. – № 2 (42). – С. 139–145.
12. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / С.Ю. Долингер, А.Г. Лютаевич, В.Н. Горюнов и др. // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 178–183.
13. Грачева, Е.И. Оценка величины потерь электроэнергии в электрических сетях до 1000 В / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2003. – № 1. – С. 108–117.
14. Romanova, V.V. Effect of asymmetry of supply voltages on asynchronous motor operation modes / V.V. Romanova, S.V. Khromov // Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems (RSES 2018). – 2018. – Vol. 58. DOI: 10.1051/e3sconf/20185803013
15. Hubana, T. Approach for identification and classification of HIFs in medium voltage distribution networks / T. Hubana, M. Saric, S. Avdakovic // IET Generation, Transmission & Distribution Journal. – 2018. – Vol. 12, no. 5. – P. 1145–1152. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0883
16. Siddique, A. Effects of voltage unbalance on induction motors / A. Siddique, G. Yadava, B. Sing // Conference record of the IEEE international symposium on electrical insulation. – 2004. – P. 26. DOI: 10.1109/elinsl.2004.1380430
17. Романова, В.В. Влияние несимметрии питающих напряжений на режимы работы асинхронных электродвигателей / В.В. Романова, С.В. Хромов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 69. Надежность развивающихся систем энергетики: в 2 кн. / отв. ред. Н.И. Воронай. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2018. – Кн. 2. – С. 402–411.

18. Faiz, J. Influence of unbalanced voltage on the steady-state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor / J. Faiz, H. Ebrahimpour, P. Pillay // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2004. – № 19 (4). – P. 657. DOI: 10.1109/tec.2004.837283
19. Effects of voltage unbalance on IM power, torque and vibrations / G.R. Bossio, C.H. De Angelo, P.D. Donolo et al. // *Diagnostics for electric machines, power electronics and drives*. – 2009. – P. 1–6. DOI: 10.1109/demped.2009.5292784
20. Романова, В.В. Эксплуатационная надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей в условиях несимметрии напряжений / В.В. Романова, С.В. Хромов // *Проблемы энерго- и ресурсосбережения*. – Ташкент: ТашГТУ, 2019. – № 4. – С. 136–148.
21. ГОСТ 30804.4.30–2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – М.: Стандартинформ, 2014. – 52 с.
22. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018665997 Российская Федерация. Программа для определения оптимального места установки средств симметрирования / В.В. Романова, К.С. Балбекина. – Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
24. Romanova, V.V. Development of procedures for determining the optimal placement of symmetrization devices for electrical supply systems 0.4 kV with motor-actuated load / V.V. Romanova, S.V. Khromov, I.F. Suvorov // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2018. – No. 11 (5). – P. 528–535.
25. SQLite Database and its Application on Embedded Platform / Y.V. Sai Bharadwaj, Sai Bhageerath Yarrapatruni, Dr. Prasada Rao YVSSSV // *International Journal of Computer Trends and Technology*. – 2019. – No. 67. – P. 1–6. DOI: 10.14445/22312803/ijctt-v67i2p101
26. Фрост, Р. Базы данных. Проектирование и разработка / Р. Фрост, Д. Дей, К. Ван Слайк. – М.: Изд-во «NT Press». – 2007. – 570 с.
27. Медведев, В. Особенности объектно-ориентированного программирования на C++/CLI, C# и Java / В. Медведев. – Казань: РИЦ «Школа». – 2010. – 444 с.
28. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС. – 2009. – 456 с.
29. Технический паспорт нормализатора [Электронный ресурс]. – <https://normal.ru/tekhnicheskiy-passport> (дата обращения: 01.02.2020).
30. Трансформатор симметрирующий каталог [Электронный ресурс]. – <https://www.elec.ru/files/2013/06/20/katalog-tst.pdf> (дата обращения: 01.02.2020).
31. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учеб. для бакалавров / отв. ред. И.П. Копылов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Юрайт», 2017. – 767 с.
32. Шидловский, А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – Киев: Наук. думка, 1985. – 268 с.
33. Прейскурант цен на капитальный ремонт электродвигателей [Электронный ресурс]. – http://www.megom.ru/remont_more1/ (дата обращения: 01.02.2020).
34. Коверникова, Л.И. Качество электрической энергии, современное состояние, проблемы, предложения по их решению: моногр. / Л.И. Коверникова, Р.Г. Шамонов, В.В. Суднова; отв. ред. Н.И. Вороняй. – Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с.
35. Правила применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии [Электронный ресурс]. – https://nashaucheba.ru/v7800/pравила_применения_скидок_и_надбавок_к_тарифам_на_электрическую_энергию_за_потребление_и_генерацию_реактивной_энергии (дата обращения: 01.02.2020).
36. Серков, А. Правовая ответственность за нарушение требований к качеству энергии / А. Серков // *Коммунальный комплекс России*. – М.: Изд-во «Информ», 2015. – № 3 (51). – С. 81–84.
37. Сендерович, Г.А. Актуальность определения ответственности за нарушение качества электроэнергии по показателям колебаний напряжения / Г.А. Сендерович, А.В. Дяченко // *Электротехника и электромеханика*. – 2016. – № 2. – С. 54–60.
38. Непомнящий, В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей / В.А. Непомнящий. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2010. – 188 с.
39. Бухгалтерский баланс за 2018 год. – 2019. – 178 с.
40. Cunningham, W.H. Energy conservation, price increases and payback periods / W.H. Cunningham, B. Joseph // *Advances in consumer research*. – 1978. – No. 5. – P. 201–205.
41. Elmaghraby S.E. On the fallacy of averages in project risk management / S.E. Elmaghraby // *European Journal of Operational Research*. – 2005. – No. 165. – P. 307–313.

Романова Виктория Викторовна, старший преподаватель, кафедра «Энергетика», Забайкальский государственный университет, г. Чита; romanova181@mail.ru.

Хромов Сергей Владимирович, старший преподаватель, кафедра «Энергетика», Забайкальский государственный университет, г. Чита; sergeixrom@inbox.ru.

Гонин Валерий Николаевич, канд. экон. наук, профессор, заведующий кафедрой «Экономика и бухгалтерский учёт», Забайкальский государственный университет, г. Чита, vngonin@mail.ru.

Поступила в редакцию 17 февраля 2020 г.

DOI: 10.14529/power200202

CALCULATING THE COST-EFFECTIVENESS OF ADOPTING SYMMETRIZATION EQUIPMENT IN A MOTOR-CARRYING ELECTRICAL COMPLEX

V.V. Romanova, romanova181@mail.ru,

S.V. Khromov, sergeixrom@inbox.ru,

V.N. Gonin, vngonin@mail.ru

Transbaikal State University, Chita, Russian Federation

This paper covers the key aspects of developing a method for calculating the cost-effectiveness of adopting symmetrization equipment in a motor-carrying electrical complex. Voltage asymmetry is observed in grids of any voltage class. Analysis of earlier studies into voltage asymmetry in the operational 0.4; 6; and 35-kV grids in Zabaikalsky Krai shows that GOST 32144–2013, an interstate standard for the quality of electricity, is being breached systematically on a large scale. Analyzed grids demonstrate fairly high levels of voltage asymmetry. Voltage asymmetry has negative electromagnetic and process-related effects: additional power losses, faster insulation aging, and premature electrical equipment failure. This is why, minimizing voltage asymmetry is imperative, and so is cost-effectiveness analysis of adopting symmetrization equipment in the electrical complex.

The developed method is comprehensive and takes into account the cost-effectiveness components, evaluation of the effect of adopting them, as well as the variability of their applied use. The calculation method is intended to help make sound decisions on whether symmetrization equipment is necessary for a motor-carrying electrical complex. The method is meant to test the feasibility of adopting symmetrization equipment to normalize voltage in grids and improve the operational reliability of asynchronous motors. The calculation method has been tested in an electricity delivery segment in the village of Taptugary, Mogochinsky Municipality, Zabaikalsky Krai. The paper analyzes and discusses the obtained results and draws appropriate conclusions.

Keywords: quality of electricity, voltage asymmetry, operational reliability of asynchronous motors, symmetrization device, cost-effectiveness.

References

1. Kuznetsov N.L. *Nadjozhnost' elektricheskikh mashin* [The reliability of electrical machines]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI Publ., 2006. 432 p.
2. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L., Gorpinich A.V., Shvecova I.A. [Reliability of electrical equipment operation with reduced power quality]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu: zb. nauk. prac'*. Mariupol', Izd-vo PDTU. 2005, no. 15, pt. 2, pp. 25–29. (in Russ.)
3. Jayatunga U., Perera S., Ciufu P., Agalgaonkar A. Voltage unbalance emission assessment: Sources of contribution and their ranking. *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2013, pp. 1–6. DOI: 10.1109/aupec.2013.6725398
4. Pinchuk O.G. [Energy performance of an induction motor with various parameters of asymmetry of the supply voltage]. *Elektrotehnika i energetika. Naukovi prac'i DonNTU*, 2008, no. 8 (140), pp. 201–205. (in Russ.)
5. Filho A.L., Garcia Diogo, Nascimento Francisco, Cormane Jorge [Study of voltage unbalance conditions based on the behavior of the complex voltage unbalance factor]. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2010, pp. 184–189. DOI: 10.1109/tdc-la.2010.5762880
6. Samojlenko I.A. [Classification and systematization of types of damage from low quality of electric energy], *Ekonomika Kryma* [Electronics of Crimea], 2010, no. 2, pp. 109–115. (in Russ.)

7. Pillay P., Manyage M. Definitions of voltage unbalance. *IEEE Power Eng Rev.*, 2001, 21 (5), pp. 1–4.
8. Kartashev I.I., Tul'skiy V.N., Shamonov R.G. *Upravlenie kachestvom elektroenergii: uchebnoe posobie* [Power Quality Management: A Training book]. Moscow, MEI Publ., 2017. 347 p.
9. Ded A.V., Parshukova A.V., Halitov N.A. [Assessment of additional power losses from asymmetry of voltages and currents in the elements of power supply system's]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Basic Research], 2015, no. 10, pt. 3, pp. 421–425. (in Russ.)
10. Ded A.V., Shelehina L.Ju., Simakov A.V. [Methods for calculating losses due to the asymmetry of currents and voltages]. *Rossiya molodaja: peredovye tekhnologii – v promyshlennost'* [Young Russia: advanced technologies into industry], 2017, no. 1, pp. 183–188. (in Russ.)
11. Dulepov D.E., Kondranenkova T.E. [Reducing the loss of electrical energy under asymmetric conditions in rural distribution electric networks of 0.38 kV]. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik* [Far Eastern Agricultural Bulletin], 2017, no. 2 (42), pp. 139–145. (in Russ.)
12. Dolinger S.Yu., Ljutarevich A.G., Gorjunov V.N., Safonov D.G., Cheremisin V.T. [Evaluation of additional power losses from a decrease in the quality of electric energy in the elements of power supply system's]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2013, no. 2 (120), pp. 178–183. (in Russ.)
13. Gracheva E.I., Naumov O.V. [Estimation of electric energy losses in electric networks up to 1000 V]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [News of higher educational institutions. Energy Issues], 2003, no. 1, pp. 108–117. (in Russ.)
14. Romanova V.V., Khromov S.V. Effect of asymmetry of supply voltages on asynchronous motor operation modes. *Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems (RSES 2018)*, 2018, vol. 58. DOI: 10.1051/e3sconf/20185803013
15. Hubana T., Saric M., Avdakovic S. [Approach for Identification and Classification of HIFs in Medium Voltage Distribution Networks]. *IET Generation, Transmission & Distribution Journal*, 2018, vol. 12, no. 5, pp. 1145–1152. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0883
16. Siddique A., Yadava G., Sing B. [Effects of voltage unbalance on induction motors]. *Conference record of the IEEE international symposium on electrical insulation*, 2004. 26 p. DOI: 10.1109/elinsl.2004.1380430
17. Romanova V.V., Khromov S.V. [The influence of asymmetry of supply voltages on the operating modes of asynchronous electric motors]. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki* [Methodological issues of researching the reliability of large energy systems]. Irkutsk, ISJeM SO RAN Publ., 2018, no. 69, pp. 402–411. (in Russ.)
18. Faiz J., Ebrahimpour H., Pillay P. [Influence of unbalanced voltage on the steady-state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, no. 19 (4), 657 p. DOI: 10.1109/tec.2004.837283
19. Bossio G.R., De Angelo C.H., Donolo P.D., Castellino A.M., Garcia G.O. [Effects of voltage unbalance on IM power, torque and vibrations]. *Diagnostics forelectric machines, power electronics and drive*, 2009, pp. 1–6. DOI: 10.1109/demped.2009.5292784
20. Romanova V.V., Khromov S.V. [Operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors in conditions of voltage unbalance]. *Problemy energo- i resursosberezheniya* [Energy and Resource Saving Issues]. Tashkent, TashGTU Publ., 2019, no. 4, p. 136–148. (in Russ.)
21. GOST 30804.4.30–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmerenij pokazatelej kachestva elektricheskoy energii* [Electric energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Methods for measuring the quality of electric energy]. Moscow, Standartinform, 2014. 52 p.
22. GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektroobrazovaniya obshchego naznacheniya* [Electric Energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2014. 19 p.
23. Romanova V.V., Balbekina K.S. *Programma dlya opredeleniya optimal'nogo mesta ustanovki sredstv simmetrirovaniya* [The program for determining the optimal installation location of the means of balancing]. Computer Registration Certificate RF 2018665997. 1 p.
24. Romanova V. V., Khromov S. V., Suvorov I. F. [Development of procedures for determining the optimal placement of symmetration devices for electrical supply systems 0.4 kV with motor-actuated load]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologie*, 2018, no. 11(5), pp. 528–535. (in Russ.)
25. Y.V. Sai Bharadwaj, Sai Bhageerath Yarrapatruni, Dr. Prasada Rao YVSSSV [SQLite Database and its Application on Embedded Platform]. *International Journal of Computer Trends and Technology*, 2019, no. 67, pp.1–6. DOI: 10.14445/22312803/ijctt-v67i2p101
26. Frost R., Dey D., Van K. Slayk. *Bazy dannykh. Proektirovanie i razrabotka* [Database. Design and development]. Moscow, INT Press Publ., 2007. 570 p.

27. Medvedev V. *Osobennosti obektno-orientirovannogo programmirovaniya na C++/CLI, C# i Java* [Features of object-oriented programming in C++ / CLI, C# and Java]. Kazan', RIC "Shkola" Publ., 2010. 444 p.
28. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Loss of Electricity. Reactive power. Electricity Quality: A Guide for Practical Calculations]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p.
29. *Tekhnicheskij pasport normalizatora* [Technical passport of the Normalizer]. Available at: <https://normel.ru/tekhnicheskij-pasport> (accessed 01.02.2020).
30. *Transformator simmetriruyushhiy katalog* [Transformer symmetrical catalog]. Available at: <https://www.elec.ru/files/2013/06/20/katalog-tst.pdf> (accessed 01.02.2020).
31. Shidlovskiy A.K., Kuznecov V.G. *Povyshenie kachestva energii v elektricheskikh setyah* [Improving the quality of energy in electrical networks]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1985. 268 p.
32. Kopylov I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Yurayt Publ., 2017. 767 p.
33. *Preyskurant tsen na kapital'nyy remont el. Dvigatoley* [Price list for the overhaul of engines]. Available at: http://www.megom.ru/remont_more1/ (accessed 01.02.2020).
34. Kovernikova L.I., Shamonov R.G., Sudnova V.V. *Kachestvo elektricheskoy energii, sovremennoe sostoyanie, problemy, predlozheniya po ikh resheniyu: monografiya* [The quality of electric energy, current status, problems, suggestions for their solution: monograph]. R. editor N.I. Voropay. Novosibirsk, Nauka Publ., 2017. 219 p.
35. *Pravila primeneniya skidok i nadvavok k tarifam na elektricheskuyu energiyu za potreblenie i generatsiyu reaktivnoy energii* [Rules for applying discounts and allowances to tariffs for electric energy for consumption and generation of reactive energy]. Available at: https://nashaucheba.ru/v7800/pravila_primeneniya_skidok_i_nadvavok_k_tarifam_na_elektricheskuyu_energiju_za_potreblenie_i_generatsiyu_reaktivnoy_energii (accessed 01.02.2020).
36. Serkov A. [Legal responsibility for violation of the requirements for energy quality]. *Kommunal'nyy kompleks Rossii. Nauchnyy zhurnal*. Moscow, Inform Publ., 2015, no. 3 (51), pp. 81–84. (in Russ.)
37. Senderovich G.A., Dyachenko A.V. [The relevance of determining responsibility for violation of the quality of electricity according to indicators of voltage fluctuations]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika* [Electronics and electrical engineering], 2016, no. 2, pp. 54–60. (in Russ.)
38. Nepomnyashhiy V.A. *Ekonomicheskie poteri ot narusheniy elektroснабзheniya potrebiteley* [Economic losses from power outages]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI Publ., 2010. 188 p.
39. *Buhgalterskiy balans za 2018 god* [The balance sheet for 2018], 2019. 178 p.
40. Cunningham W.H., Joseph B. Energy conservation, price increases and payback periods. *Advances in consumer research*, 1978, no. 5, pp. 201–205.
41. Elmaghraby S.E. On the fallacy of averages in project risk management. *European Journal of Operational Research*, 2005, no. 165, pp. 307–313.

Received 17 February 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Романова, В.В. Методика расчета экономической эффективности внедрения технических средств симметрирования в электротехнический комплекс с электродвигательной нагрузкой / В.В. Романова, С.В. Хромов, В.Н. Гонин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 15–27. DOI: 10.14529/power200202

FOR CITATION

Romanova V.V., Khromov S.V., Gonin V.N. Calculating the Cost-Effectiveness of Adopting Symmetrization Equipment in a Motor-Carrying Electrical Complex. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 15–27. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200202