

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАТРАТ НА ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В СЕТЯХ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

А.С. Сарваров¹, Ю.В. Шевырëв², О.В. Фëдоров³

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск;

² Московский государственный горный университет, г. Москва;

³ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

Рассмотрены различные способы повышения качества электроэнергии в сетях с полупроводниковыми преобразователями. Среди них выделены вопросы применения сетевых реакторов, переход к многопульсным схемам, использование фильтрокомпенсирующих устройств со ступенчатым и косвенным регулированием. При проведении оценки современных средств улучшения качества электроэнергии выделяются преобразователи частоты с активным выпрямителем и полупроводниковые источники реактивной мощности на полностью управляемых силовых ключах. Техничко-экономические аспекты применения фильтрокомпенсирующих устройств рассмотрены для двух случаев: питание от линии электропередачи и от системы автономного электроснабжения. Приведены результаты инструментальных исследований на одном из нефтепромыслов при широком использовании центробежных электронасосов с частотно-регулируемым приводом, представленные в виде осциллограмм напряжения и тока на вводе распределительного устройства 6 кВ их спектральный состав. Из графиков видно, что форма напряжений и токов существенно искажена. При выполнении технико-экономических расчетов различных вариантов выделяются основные экономические составляющие показателей, такие как капитальные и текущие эксплуатационные затраты. При отличии рассматриваемых систем по уровню качества электроэнергии к приведенным затратам прибавляется величина убытка от снижения её качества. При невозможности вычисления убытка учитываются затраты на приобретение регуляторов качества электроэнергии. При питании от системы автономного электроснабжения рассмотрен широко применяемый на практике вариант, когда в качестве автономного источника энергии применяются дизель-генераторы. В этом случае в состав приведенных затрат, в отличие от предыдущего, входят годовые затраты на производство электрической энергии дизель-генераторами. Приведены методы расчета затрат на техническую реализацию средств повышающих качество электроэнергии в питающих сетях, реализованных в системах питания от линии электропередачи и в системах при автономном питании. Показан пример расчета, в котором реализована методика определения области эффективного применения регуляторов качества электроэнергии.

Ключевые слова: реактивная мощность, искажения, компенсация, затраты, технико-экономическая эффективность.

На нефтедобывающих, горных, металлургических предприятиях широко применяются регулируемые электроприводы с полупроводниковыми преобразователями. Их массовое применение, если не принимать специальных мер, приводит к значительному искажению синусоидальности формы напряжения сети и снижению коэффициента мощности [1, 2].

Допустимый уровень высших гармоник в напряжении сети может быть обеспечен без дополнительных средств повышения качества электроэнергии, если отношение мощности короткого замыкания сети $S_{кз}$ в узле подключения преобразователя к его полной мощности $S_{тп}$, в зависимости от пульсности преобразователя, равно или больше значений, указанных в таблице. Если отношение

$S_{кз}/S_{тп}$ меньше указанных в таблице, то необходимо применение дополнительных средств повышения качества электроэнергии [3].

Предельные значения отношения $S_{кз}/S_{тп}$

Пульсность схемы	$S_{кз}/S_{тп}$
6	90
12	65
24	38
32	15

Существуют различные способы повышения качества электроэнергии.

Применение сетевых реакторов. Чтобы уменьшить взаимное влияние полупроводниковых преобразователей, питающихся от общего трансфор-

матора, ограничить коммутационные перенапряжения, ограничить высшие гармоники в сети, увеличить надёжность работы преобразователя при больших искажениях синусоидальной формы напряжения сети, полупроводниковые преобразователи необходимо подключать к питающей сети через специальный трёхфазный сетевой реактор L_p [4].

Многопульсные схемы. Уменьшение искажений синусоидальной формы кривой напряжения в точке присоединения полупроводникового преобразователя к сети может быть достигнуто за счёт применения многопульсных схем. Пульсность схемы определяется числом пульсаций выпрямленного напряжения за один период основной частоты. Трёхфазная мостовая схема является 6-пульсной. На основе трёхфазных мостовых схем выполняют схемы с большей пульсностью (применяются 12-, 24-, 36-пульсные схемы).

Фильтрокомпенсирующие устройства. В сетях со значительным содержанием высших гармоник, генерируемых нелинейными нагрузками, применение обычных средств компенсации реактивной мощности, рассчитанных на синусоидальные токи и напряжения, наталкивается на серьёзные технические трудности. В связи с этим в сетях с полупроводниковыми преобразователями применяют фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ), которые обеспечивают одновременно компенсацию реактивной мощности основной частоты и фильтрацию высших гармонических. ФКУ целесообразно размещать в узле подключения нелинейной нагрузки.

В состав ФКУ входит набор параллельно включенных фильтров, настроенных на фильтрацию начального спектра канонических высших гармоник, генерируемых полупроводниковыми преобразователями ($v = 5, 7, 11, 13$). Фильтры состоят из последовательно включенных конденсаторов и реакторов, образуя резонансные LC-цепочки, которые одновременно генерируют в сеть емкостной ток основной частоты.

В тех случаях, когда по условиям требований обеспечения качества напряжения требуется регулирование реактивной мощности, возможны два варианта схем ФКУ:

- ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности (ФКУ-С);
- ФКУ с непрерывным «косвенным» регулированием реактивной мощности (ФКУ-К).

Конденсаторные установки, регулируемые с антирезонансными реакторами. Данный класс установок относится к конденсаторным установкам ступенчатого типа, в которых с помощью быстродействующих полупроводниковых выключателей к сети подключаются или от неё отключаются отдельные ступени установки, и тем самым осуществляется дискретное регулирование реактивной мощности. В данных конденсаторных установках применяются антирезонансные реакторы

со смещенной резонансной частотой относительно частоты канонической гармоники. Они предназначены для защиты конденсаторов от высших гармоник при отсутствии в сети гармоник с частотами ниже резонансной частоты конденсаторной установки.

Кроме того, наличие реакторов позволяет уменьшить искажения синусоидальной формы напряжения до приемлемых значений.

Силовые активные фильтры. Перспективным средством компенсации реактивной мощности являются полупроводниковые источники реактивной мощности, в которых применяются запираемые полупроводниковые приборы: двухоперационные тиристоры, силовые транзисторы. Регулирование напряжения в таких преобразователях осуществляется методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Это позволяет работать как в режиме генерирования реактивной мощности, так и в режиме её потребления. Кроме того, при соответствующем законе управления, осуществляется генерирование управляемых высших гармоник в противофазе с фактическими гармониками вентильных преобразователей, что позволяет получить практически синусоидальную форму напряжения сети.

Активные выпрямители. Несомненные достоинства частотно-регулируемого асинхронного электропривода по сравнению с нерегулируемым привели к массовому применению полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ) на нефтедобывающих, горных и металлургических предприятиях. В то же время массовое применение ПЧ является причиной значительного искажения синусоидальной формы напряжения в электрических сетях. Для получения нормативного коэффициента искажения синусоидальной формы напряжения сети необходимо применение ФКУ.

Другим способом улучшения качества электроэнергии при работе частотно-регулируемого электропривода переменного тока является применение преобразователей частоты с активным выпрямителем. Под активным выпрямителем понимается выпрямитель на полностью управляемых полупроводниковых приборах (например, силовые транзисторы), работающих в релейном режиме или в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Это даёт возможность обеспечить требуемые значения таких показателей качества электроэнергии, как отклонение напряжения на вводе электротехнического комплекса и коэффициент искажения синусоидальной формы напряжения сети, получить коэффициент мощности, равный единице. Требуемые показатели качества электроэнергии обеспечиваются за счёт алгоритмов управления полупроводниковыми приборами в релейном режиме или режиме ШИМ.

Активные выпрямители позволяют реализовать двухсторонний обмен энергией с питающей

сеть и тем самым улучшить энергетические показатели электропривода, обеспечить практически синусоидальный сетевой ток, плавно регулировать коэффициент мощности [5].

Из сказанного выше следует, что существует большой выбор регуляторов качества электроэнергии (РКЭ), позволяющих решить проблемы искажения синусоидальной формы напряжения сети и снижения коэффициента мощности сети. Однако на практике во многих случаях при внедрении регулируемых электроприводов с полупроводниковыми преобразователями не принимают мер, связанных с устранением отрицательного влияния полупроводниковых преобразователей на сеть. Одной из основных причин этого является достаточно высокая стоимость имеющихся на рынке РКЭ.

Результатом этого является ухудшению энергетических характеристик и качества электроэнергии системы: возрастает потребление реактивной мощности, происходит искажение формы напряжения сети из-за генерации полупроводниковыми преобразователями токов высших гармоник.

Подтверждением сказанного служат результаты инструментальных исследований, проведённые на одном из нефтепромыслов при широком использовании центробежных электронасосов с частотно-регулируемым приводом (ЧРП). На рис. 1 показана форма напряжения на сборных шинах 6 кВ и тока на вводе РУ-6 кВ и их спектральный состав. Из графиков видно, что форма напряжений и токов на вводах РУ-6 кВ существенно искажена.

Исследования показали, что в спектре напряжения и тока в сетях 6 кВ ярко выражены 5, 7, 11 и 13-я гармоники, а также нечетные гармоники более высокого порядка, что характерно для нелинейной нагрузки в виде станций управления с частотным преобразователем.

Результаты измерений коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения и тока, показывают, что значения нелинейных искажений напряжения в сетях 6 кВ превышают допустимый по ГОСТ Р 54149–2010 уровень, который составляет 5 %.

Искажение напряжения сети, ухудшая качество электроэнергии, приводит к ряду нежелательных воздействий на потребителей и на работу самой системы электроснабжения. Это проявляется в увеличении потерь электроэнергии в электрооборудовании, сокращении срока службы электроприёмников за счёт дополнительного старения изоляции, увеличении погрешности электроизмерительных приборов, ухудшении работы систем автоматики, телемеханики и связи и т. п. Наблюдаются случаи выхода из строя преобразователей частоты при значительных искажениях напряжения сети.

Решением проблемы выбора и применения РКЭ может явиться технико-экономическая оценка эффективности дополнительных затрат на РКЭ.

Ранее авторским коллективом были опубликованы методические аспекты технико-экономических оценок вариантов электроприводов примени-

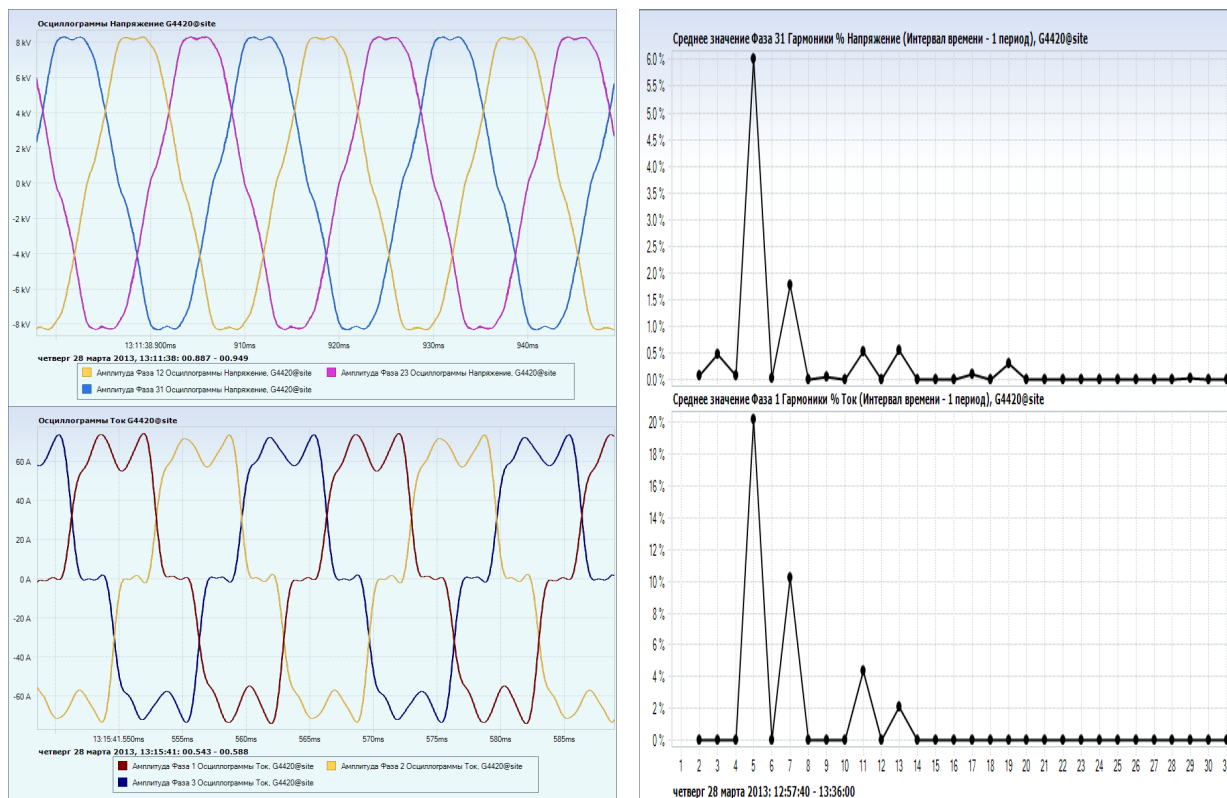


Рис. 1. Форма напряжения на сборных шинах 6 кВ и тока на вводе РУ-6 кВ и их спектральный состав

тельно к задачам выбора из возможных альтернатив [6].

При необходимости установки ФКУ необходимо различать два случая: питание от линии электропередачи и от системы автономного электроснабжения.

Питание от линии электропередачи. Приведенные затраты для этого случая равны

$$Z = EK + C + U_{кэ}, \quad (1)$$

где E – норма дисконта, определяемая на уровне кредитных ставок с учётом рисков; K – капитальные вложения в ЭТК объекта; C – текущие эксплуатационные затраты ЭТК; $U_{кэ}$ – математическое ожидание убытка (ущерба) от снижения качества электроэнергии.

При выполнении технико-экономических расчетов альтернативных вариантов требуется определение основных экономических составляющих показателей – K и C .

Капитальные затраты сравниваемых вариантов ЭТК, кроме затрат на приобретение оборудования, должны включать и другие затраты, например, затраты на его транспортировку, создание фундамента, монтажно-наладочные работы, а также на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, связанные с созданием и внедрением проектируемого электротехнического комплекса (ЭТК). Составляющие капитальных затрат, одинаковые в сравниваемых вариантах, во многих случаях можно не учитывать. Капитальные затраты возможных альтернатив состоят из Π – стоимость оборудования; K_t – затраты на его транспортировку и K_p – затраты на строительные и монтажно-наладочные работы.

Для целей технико-экономических сравнений допустимо затраты на транспортировку, строительные и монтажно-наладочные работы определять пропорционально стоимости оборудования.

Текущие эксплуатационные затраты ЭТК равны

$$C = C_a + C_{po} + C_3 + C_{p3} + C_{кэ}, \quad (2)$$

где C_a – амортизационные отчисления; C_{po} – затраты на ремонт и обслуживание ЭТК; C_3 – затраты на электроэнергию; C_{p3} – надбавка к тарифу за потребление реактивной энергии; $C_{кэ}$ – надбавка к тарифу за качество электроэнергии.

Амортизационные отчисления равны

$$C_a = p_a K, \quad (3)$$

где p_a – норма амортизационных отчислений.

С целью упрощения технико-экономических расчётов допускается амортизационные отчисления определять по норме амортизации наиболее капиталоемкого элемента ЭТК.

При определении затрат на ремонт и обслуживание ЭТК допускается для технико-экономического сопоставления альтернативных вариантов использовать укрупненные расчеты затрат на ремонт и обслуживание пропорционально балансовой стоимости электрооборудования:

$$C_{po} = \sum_{i=1}^m p_{poi} K_i, \quad (4)$$

где p_{poi} – норма отчислений на ремонты и обслуживание оборудования, входящего в ЭТК.

При отличии альтернативных систем по уровню качества электроэнергии к приведенным затратам прибавляется величина убытка от снижения качества электроэнергии $U_{кэ}$. Если непосредственное вычисление убытка $U_{кэ}$ невозможно, то величина убытка может быть определена затратами на регулятор качества электроэнергии. Учет убытка $U_{кэ}$ при выборе варианта необходим, если затраты больше у варианта, обеспечивающего меньшее влияние на электрическую сеть.

Для сравнительной оценки технико-экономической эффективности дополнительных затрат на приобретение регулятора качества электроэнергии используется разность приведённых затрат для базового варианта ЭТК без РКЭ и альтернативного варианта ЭТК с РКЭ:

$$\Delta Z = E\Delta K + \Delta C + U_{кэ}, \quad (5)$$

где ΔK и ΔC – разности капитальных затрат и эксплуатационных затрат для ЭТК при отсутствии РКЭ и наличии РКЭ. При этом принято, что при наличии РКЭ убытки от снижения качества электроэнергии отсутствуют.

Применение РКЭ считается экономически оправданным, если $\Delta Z > 0$.

Разность капитальных затрат равна

$$\Delta K = -K_{фку} = -(\Pi_{фку} + K_{тфку} + K_{рфку}), \quad (6)$$

где $K_{фку}$ – капитальные затраты на РКЭ; $\Pi_{фку}$ – цена РКЭ; $K_{тфку}$ – затраты на транспортировку РКЭ; $K_{рфку}$ – затраты на строительные и монтажно-наладочные работы.

Разность эксплуатационных затрат равна

$$\Delta C = -(p_{афку} + p_{рофку})K_{фку} + \Delta C_3 + C_p + C_{кэ}, \quad (7)$$

где $p_{афку}$ – норма амортизационных отчислений для РКЭ; $p_{рофку}$ – норма отчислений на ремонты и обслуживание РКЭ; $\Delta C_3 = C_3 - C'_3$ – разность оплаты за электроэнергию при отсутствии РКЭ и наличии РКЭ; C_p , $C_{кэ}$ – надбавки к тарифу за потребление реактивной энергии и за качество электроэнергии при отсутствии РКЭ.

При вычислении разности эксплуатационных затрат надбавки к тарифам за потребление реактивной энергии и за качество электроэнергии при наличии РКЭ принимаются равными нулю. Разница в оплате за электроэнергию при отсутствии РКЭ и наличии РКЭ ΔC_3 , вызвана уменьшением потерь электроэнергии при наличии РКЭ.

Подставляя (6) и (7) в (5), получим, что разность затрат при питании от линии электропередачи равна

$$\Delta Z = -(E + p_{афку} + p_{рофку})K_{фку} + \Delta C_3 + C_p + C_{кэ} + U_{кэ}. \quad (8)$$

Питание от системы автономного электро-снабжения. Рассмотрим широко применяемый на практике вариант, когда в качестве автономного источника энергии применяются дизель-генераторы. В этом случае в состав приведенных затрат, в отличие от предыдущего, входят годовые затраты на производство электрической энергии дизель-генераторами Z_3 ,

$$Z_3 = EK + C + Z_3 + Y_{кз}. \quad (9)$$

Текущие эксплуатационные затраты ЭТК при питании от дизель-генераторов равны

$$C = C_a + C_{po}, \quad (10)$$

где C_a – амортизационные отчисления; C_{po} – затраты на ремонт и обслуживание ЭТК.

При отличии альтернативных систем по уровню качества электроэнергии к приведенным затратам прибавляется величина убытка от снижения качества электроэнергии $Y_{кз}$.

Годовые затраты на производство электрической энергии Z_3 , определяются из выражения [7]

$$Z_3 = E \left(\sum_{j=1}^m A_j + \sum_{j=1}^n B_j \right) + D + T + \Gamma, \quad (11)$$

где A_j – стоимость дизель-электрического агрегата; m – число дизель-электрических агрегатов в составе станции; B_j – стоимость сооружения и перемещения дизель-электрической станции; n – число перемещений за год; D – затраты на амортизацию и ремонт дизель-электрической станции; T – затраты на обслуживание; Γ – затраты на горюче-смазочные материалы и их доставку.

Годовые затраты на горюче-смазочные материалы и их доставку выражаются уравнением

$$\Gamma = \sum_{j=1}^m \Gamma_j, \quad (12)$$

где Γ_j – годовые затраты на горюче-смазочные материалы и их доставку, которые определяются по формуле

$$\Gamma_j = 10^{-3} \sum_{i=1}^n N_{ji} \Delta t_{ji} \times \left[(\gamma_{гji} b_{г} + \gamma_{сji} b_{с}) + b_{т} L_{т} (\gamma_{гji} + \gamma_{сji}) \right], \quad (13)$$

где n – число интервалов времени, на которых определяется мощность j -го дизель-электрического агрегата; N_{ji} – мощность j -го дизель-электрического агрегата на i -м интервале времени, кВт; Δt_{ji} – величина i -го интервала времени, на котором определяется мощность дизель-электрического агрегата, час; $\gamma_{гji}$, $\gamma_{сji}$ – удельные расходы соответственно горючих и смазочных материалов на i -м интервале времени, кг/кВт·ч; $b_{г}$, $b_{с}$ – стоимость соответственно горючих и смазочных материалов, руб./т; $b_{т}$ – стоимость доставки горюче-смазочных материалов, руб./т·км; $L_{т}$ – расстояние доставки горюче-смазочных материалов, км.

Стоимость и число дизель-электрических аг-

регатов, стоимость сооружения и перемещения дизель-электрической станции, число перемещений за год, затраты на амортизацию, ремонт и обслуживание дизель-электрической станции, затраты на смазочные материалы одинаковы в сравниваемых вариантах и поэтому их можно не учитывать. В связи с этим формула (11) упрощается и принимает вид:

$$Z_3 = \sum_{j=1}^m \left[10^{-3} (b_{г} + b_{т} L_{т}) \sum_{i=1}^n N_{ji} \Delta t_{ji} \gamma_{гji} \right]. \quad (14)$$

Нагрузка на дизель-генератор может меняться в широких пределах. Поскольку удельный расход топлива возрастает при снижении нагрузки, в расчёте затрат на производство электрической энергии необходимо использовать график или аналитическую зависимость, связывающую коэффициент увеличения расхода топлива $K_{рт}$ с коэффициентом фактической нагрузки $K_{фj}$.

При отсутствии графика зависимости расхода топлива $K_{рт}$ от коэффициентом фактической нагрузки $K_{фj}$ удобно воспользоваться методикой определения расхода топлива, предложенной в работе [8]. В соответствии с данной методикой расход топлива определяют по уравнению, аппроксимирующему нагрузочную характеристику дизеля:

$$G_j = T_j N_{енj} g_{енj} \left[(1 - \eta_{мнj}) (K_{нj} K_{фj})^2 + (2\eta_{мнj} - 1) K_{нj} + (1 - \eta_{мнj}) \right], \quad (15)$$

где G_j – расход топлива j -м двигателем внутреннего сгорания, кг, за время $T_j = \sum_{i=1}^n \Delta t_{ji}$; $N_{енj}$ – номинальная мощность двигателя внутреннего сгорания, кВт; $g_{енj}$ – удельный расход топлива при номинальной мощности, кг/кВт·ч; $\eta_{мнj}$ – механический КПД двигателя внутреннего сгорания; $K_{нj}$ – средний коэффициент нагрузки двигателя внутреннего сгорания; $K_{фj}$ – коэффициент формы графика нагрузки двигателя внутреннего сгорания.

Средний коэффициент нагрузки двигателя внутреннего сгорания равен

$$K_{нj} = \frac{N_{есрj}}{N_{енj}}, \quad (16)$$

где $N_{есрj}$ – среднее значение мощности двигателя внутреннего сгорания за время T_j :

$$N_{есрj} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{ji} \Delta t_{ji}}{T_j}. \quad (17)$$

Коэффициент формы графика нагрузки двигателя внутреннего сгорания равен

$$K_{фj} = \frac{N_{ескj}}{N_{есрj}}, \quad (18)$$

где $N_{ескj}$ – среднеквадратичное значение мощности двигателя внутреннего сгорания за время T_j :

$$N_{\text{еск}j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n N_{ji}^2 \Delta t_{ji}}{T_j}}. \quad (19)$$

В этом случае годовые затраты на топливо для одного дизель-электрического агрегата определяются по формуле

$$\Gamma_j = 10^{-3} G_j (b_r + b_t L_T). \quad (20)$$

Окончательно формула для определения затрат на производство электрической энергии принимает вид:

$$Z_3 = \sum_{j=1}^m [10^{-3} (b_r + b_t L_T) G_j], \quad (21)$$

или

$$Z_3 = C_{yt} G, \quad (22)$$

где $C_{yt} = b_r + b_t L_T$ – удельная стоимость топлива с учётом его доставки, руб./т; $G = 10^{-3} \sum_{j=1}^m G_j$ – общий расход топлива дизелями за год, т.

Разность приведённых затрат для ЭТК без РКЭ и альтернативного варианта с РКЭ:

$$\Delta Z = E \Delta K + \Delta C + \Delta Z_3 + Y_{кз}, \quad (23)$$

где ΔK , ΔC , ΔZ_3 – разности капитальных затрат, эксплуатационных затрат и затрат на производство электрической энергии для ЭТК с автономным питанием при отсутствии РКЭ и наличии РКЭ. При этом принято, что при наличии РКЭ убытки от снижения качества электроэнергии отсутствуют.

Разность капитальных затрат равна

$$\Delta K = -K_{\text{фку}} = -(C_{\text{фку}} + K_{\text{тфку}} + K_{\text{рфку}}), \quad (24)$$

где $K_{\text{фку}}$ – капитальные затраты на ФКУ; $C_{\text{фку}}$ – цена РКЭ; $K_{\text{тфку}}$ – затраты на транспортировку РКЭ; $K_{\text{рфку}}$ – затраты на строительные и монтажно-наладочные работы.

Разность эксплуатационных затрат равна

$$\Delta C = -(p_{\text{афку}} + p_{\text{рофку}}) \cdot K_{\text{фку}}, \quad (25)$$

где $p_{\text{афку}}$ – норма амортизационных отчислений для РКЭ; $p_{\text{рофку}}$ – норма отчислений на ремонты и обслуживание РКЭ.

Разность затрат на производство электрической энергии равна

$$\Delta Z_3 = C_{yt} (G - G'), \quad (26)$$

где G , G' – общий расход топлива дизелями за год при отсутствии РКЭ и наличии РКЭ.

Подставляя (25)–(27) в (24), получим, что разность затрат при питании от системы автономного электроснабжения равна

$$\Delta Z = -(E + p_{\text{афку}} + p_{\text{рофку}}) K_{\text{фку}} + C_{yt} (G - G') + Y_{кз}. \quad (27)$$

Определим границу эффективности дополнительных инвестиций в РКЭ для рассмотренных двух случаев электроснабжения ЭТК из условия $\Delta Z > 0$:

$$K_{\text{фку}} < \frac{\Delta C_y + Y_{кз}}{E + p_{\text{афку}} + p_{\text{рофку}}}, \quad (28)$$

где ΔC_y – разница в стоимости электроэнергии при отсутствии РКЭ и его наличии.

При питании от линии электропередачи

$$\Delta C_y = \Delta C_3 + C_p + C_{кз}. \quad (29)$$

При питании от автономной системы электроснабжения

$$\Delta C_y = C_{yt} (G - G'). \quad (30)$$

Выражение (28) позволяет определить область экономичности применения РКЭ в ЭТК. Если для выбранного варианта РКЭ неравенство (28) выполняется, то вариант ЭТК с РКЭ является экономически оправданным. В противном случае экономически оправданным является вариант ЭТК без РКЭ.

Оценка эффективности использования ФКУ может производиться и на основе срока окупаемости [9]

$$T_{\text{ок}} = \Delta_3 / \Delta_p, \quad (31)$$

где Δ_p – экономическая оценка результата, а Δ_3 – экономическая оценка затрат.

Для рассматриваемого случая срок окупаемости равен

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{\frac{\Delta C_y + Y_{кз}}{K_{\text{фку}}} - (p_{\text{афку}} + p_{\text{рофку}})}. \quad (32)$$

Полученные выражения (28) и (32) позволяют дать технико-экономическую оценку эффективности дополнительных затрат на РКЭ.

Пример применения методики. В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены графики областей экономичности и срока окупаемости ступенчатого ФКУ, которое применяется на буровых установках с тиристорным электроприводом постоянного тока, предназначенных для бурения нефтяных скважин глубиной до 4 км.

Независимым параметром является длина питающей линии 6 кВ $L_{\text{лб}}$. Расчёты были выполнены в ценах 2005 г.

Анализ приведённых графиков позволяет сделать следующие выводы.

Приведённые затраты, граница эффективности дополнительных инвестиций в ФКУ, срок окупаемости в слабой степени зависят от длины линии, если учитывается надбавка к тарифу за качество электроэнергии.

Выполненные исследования показали, что при питании от линии электропередачи вариант ЭТК с ФКУ является экономически оправданным, если для выбранного варианта ФКУ инвестиции не превышают 1,25–1,30 млн руб. в ценах 2005 г.

Срок окупаемости ФКУ зависит от величины инвестиций. При сроке окупаемости до 1 года инвестиции в ФКУ не должны превышать 400 тыс. руб.

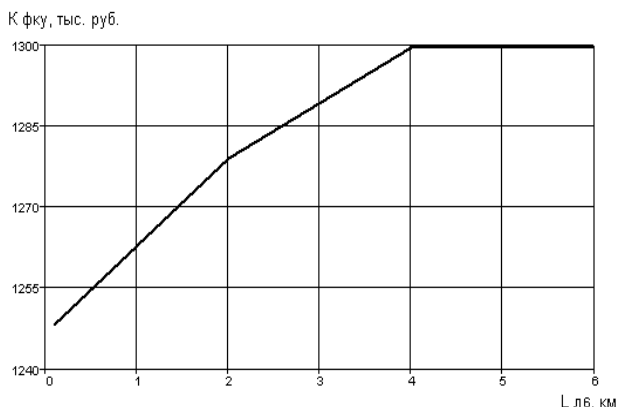


Рис. 2. Граница эффективности дополнительных инвестиций в ФКУ

При сроке окупаемости до 2 лет инвестиции в ФКУ могут быть увеличены до 600 тыс. руб.

Необходимо отметить, что реально срок окупаемости будет меньше, так как при технико-экономической оценке не учитывались повторно-кратковременные и кратковременные режимы работы и вспомогательные технологические операции, а также величина ущерба, обусловленного отклонением напряжения от номинального и не-синусоидальностью напряжения.

Заключение

1. Имеется большой выбор регуляторов качества электроэнергии (РКЭ), позволяющих решить проблемы искажения синусоидальной формы напряжения сети и снижения коэффициента мощности сети. Однако при внедрении регулируемых электроприводов с полупроводниковыми преобразователями во многих случаях не принимают мер, связанных с устранением отрицательного влияния полупроводниковых преобразователей на сеть. Одной из основных причин этого является достаточно высокая стоимость имеющихся на рынке РКЭ.

2. Решением проблемы выбора и применения РКЭ может явиться технико-экономическая оценка эффективности дополнительных затрат на РКЭ.

3. На основе технико-экономического подхода предложена методика определения областей эффективности вариантов ЭТК с РКЭ и без РКЭ при централизованном и автономном электропитании. Методика основывается на сопоставлении приведенных затрат по этим вариантам и определении границы эффективности дополнительных инвестиций в РКЭ и срока окупаемости.

Литература

1. Онищенко, Г.Б. Проблемы и перспективы развития электропривода / Г.Б. Онищенко,

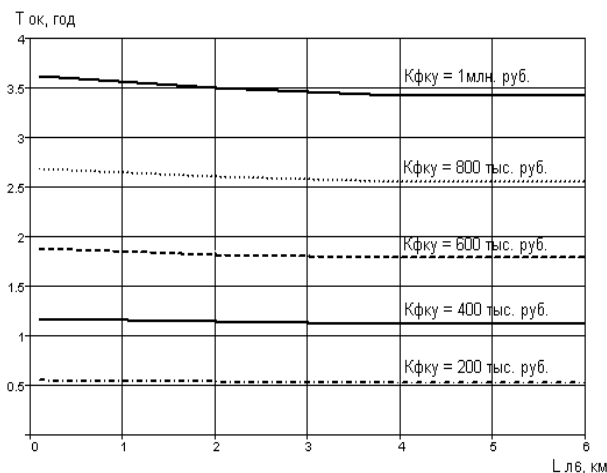


Рис. 3. Срок окупаемости при различных инвестициях в ФКУ

М.Г. Юньков // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. – 2014. – Т. 1. – С. 5–9.

2. Анализ показателей качества электроэнергии в системе промышленного электроснабжения с мощными тиристорными электроприводами / Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмин, А.Н. Шеметов, А.А. Николаев // Вестник МГТУ. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – № 3. – С. 6–11.

3. Добрусин, Л.А. Основы теории и проектирования оптимальных фильтрокомпенсирующих устройств для преобразователей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Л.А. Добрусин. – М.: Всерос. электротехн. ин-т, 1999. – 40 с.

4. Степанян, С.П. Моделирование автономной системы СГ-ТП-Д / С.П. Степанян, Б.М. Парфёнов, А.В. Шинянский // Электротехника. – 1974. – № 10. – С. 39–41.

5. Козярук, А.Е. Техничко-экономические показатели ЭЭС горных машин при использовании преобразователей частоты с активным выпрямителем / А.Е. Козярук, А.В. Кулыгин // ЭЛЕКТРОСИЛА. Приложение к сб. № 42. – 2003. – С. 57–64.

6. Федоров, О.В. Электропривод в промышленности: моногр. / О.В. Федоров, А.С. Сарваров, Ю.В. Шевырев. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 130 с.

7. Алексеев, В.В. Энергоснабжение геологоразведочных организаций / В.В. Алексеев, А.А. Глац. – М.: Недра, 1980.

8. Жернаков, А.П. Экономия топливно-энергетических ресурсов при геологоразведочных работах / А.П. Жернаков, В.Д. Акимов, В.В. Алексеев. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 324 с.

9. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция). Офици. изд. – М.: Экономика, 2000. – 82 с.

Сарваров Анвар Сабулханович, профессор кафедры «Автоматизированный электропривод и механика», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; anvar@magtu.ru.

Шевырёв Юрий Вадимович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрификация и энергоэффективность горных предприятий», Московский государственный горный университет, г. Москва; uvshev@yandex.ru.

Фёдоров Олег Васильевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Управление инновационной деятельностью», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева; fedorov_o@mail.ru.

Поступила в редакцию 18 февраля 2015 г.

DOI: 10.14529/power150302

ASSESSMENT OF COST-EFFECTIVENESS OF IMPROVING ENERGY PERFORMANCE IN NETWORKS WITH SEMICONDUCTOR CONVERTERS

A.S. Sarvarov, *Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, anvar@magtu.ru,*

Yu.V. Shevyrev, *Moscow State Mining University, Moscow, Russian Federation, uvshev@yandex.ru,*

O.V. Fedorov, *Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation, fedorov_o@mail.ru*

Various methods of improving the quality of electricity networks with semiconductor converters are discussed. Among them, the use of network reactors, transition to multi-pulse schemes, the use of filter-compensating devices with a step and indirect regulation. The allocation of modern means of improving the quality of electricity allocates frequency converters with an active rectifier and semiconductor sources of reactive power on a fully controlled power switches. Technical and economic aspects of the use of filter-compensating devices are discussed for two cases: the power of the power lines and the system of autonomous power supply. The results of instrumental research at one of the oil-extracting enterprises with extensive use of centrifugal pumps with variable frequency drive are presented in the form of voltage and current waveforms at the input of 6 kV- distribution device, their spectral composition. The graphs show that the shape of the voltages and currents is strongly distorted. During the execution of the technical-economic calculations of various options main indicators of economic components, such as capital and ongoing operating costs, are discussed. In addition to the differences between the systems in terms of quality of electricity, the amount of impairment loss of its quality is added to the described expenses. If it is unable to calculate the losses, the cost of purchasing power quality controls is calculated. When powered from a stand-alone power supply system one option is widely used in practice, when diesel generators are used as an autonomous source of energy. In this case, presented costs, unlike the previous one, consist of annual costs for the production of electric energy by diesel generators. Methods of calculating the costs of technical implementation of means improving the quality of electricity in the power network implemented in the power systems of the power lines and systems with autonomous power supply are discussed. An example of the calculation, which implements the method of determining the effective use of power quality controls, is given.

Keywords: reactive power, distortion, compensating, costs, technical and economic efficiency.

References

1. Onishchenko G.B., Yun'kov M.G. [Problems and Prospects of the Electric Drive]. *Trudy VIII mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric AEP 2014]. Saransk, Ogarev Mordovia State University Publ., 2014, vol. 1, pp. 5–9. (in Russ)
2. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Shemetov A.N., Nikolaev A.A. [Analysis of the Power Quality in the Power

Industry with Powerful Thyristor Electric Drives]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. Magnitogorsk, 2006, no. 3, pp. 6–11. (in Russ.)

3. Dobrusin L.A. *Osnovy teorii i proektirovaniya optimal'nykh fil'trokompensiruyushchikh ustroystv dlya preobrazovateley* [Fundamentals of the Theory and Design of Optimum Filter-Devices for Converters. Abstract of doct. diss.]. Moscow, All Russian Electrotechnical Institute Named after V.I. Lenin, 1999. 40 p. (in Russ.)

4. Stepanyan S.P., Parfenov B.M., Shinyanskiy A.V. [Modeling Autonomous System SG-TC-M]. *Russian Electrical Engineering*, 1974, no. 10, pp. 39–41.

5. Kozyaruk A.E., Kulygin A.V. [Technical and Economic Parameters of EPS Mining Machines Using Frequency Converters with an Active Rectifier]. *ELEKTROSILA*, 2003, pp. 57–64 (in Russ.)

6. Fedorov O.V., Sarvarov A.S., Shevyrev Yu.V. *Elektroprivod v promyshlennosti: monografiya* [Power Industry: Monograph]. Moscow, INFRA-M, 2008. 130 p.

7. Alekseev V.V., Glants A.A. *Energosnabzhenie geologorazvedochnykh organizatsiy* [Power Supply Geological Organizations]. Moscow, Nedra Publ., 1980.

8. Zhernakov A.P., Akimov V.D., Alekseev V.V. *Ekonomiya toplivno-energeticheskikh resursov pri geologorazvedochnykh rabotakh* [Saving Fuel and Energy Resources in Geological Prospecting]. Moscow, Geoinform-mark Publ., 2000. 324 p.

9. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov* [Guidelines for Assessing the Effectiveness of Investment Projects]. Moscow, Ekonomika Publ., 2000. 82 p.

Received 18 February 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сарваров, А.С. Оценка эффективности затрат на повышение энергетических показателей в сетях с полупроводниковыми преобразователями / А.С. Сарваров, Ю.В. Шевырëв, О.В. Фëдоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 11–19. DOI: 10.14529/power150302

FOR CITATION

Sarvarov A.S., Shevyrev Yu.V., Fedorov O.V. Assessment of Cost-Effectiveness of Improving Energy Performance in Networks with Semiconductor Converters. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 11–19. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150302