

ФИЛЬТРУЮЩИЙ КОНДЕНСАТОР СБОРНЫЙ С ТОКОДЕМПФИРУЮЩИМИ ФУНКЦИЯМИ (ФКТФ)



"Текущую энергоэффективность любой электрической системы можно достоверно оценить по величине и динамике изменений циркулирующей по ней Реактивной Энергии. Самое лучшее, идеальное - это полное её обнуление во всём объёме электрической системы"

Н.Н. Агаев

ООО «РАССАР»

Содержание

Введение	3
I. Проблемы электроснабжения и потребления.....	3
II. Анализ систем электросбережения	8
III. Фильтрующий конденсатор с токодемпфирующими функциями (ФКТФ). Назначение, принцип действия, область применения, функциональные приоритетные категории.....	10
IV. Методика расчёта экономической эффективности ФКТФ	12
V. Определение экономического эффекта от внедрения ФКТФ	16

Введение

Электрическая энергия, изменив жизнь каждого человека, так и остаётся загадочной субстанцией. Её научный портрет и реальный образ настолько несхожи, насколько звёздное небо, - наше будущее жилище, - недостижимо сегодня для нас.

Вожжами энергетической революции по праву признаются:

- Майкл Фарадей (1791-1867г.), который в 1831 году открыл механизм действия электромагнитной индукции, изобрёл конденсатор, установил законы электролиза.

- Никола Тесла (1856-1943г.). В 1888 году Н.Тесла описал явление вращающегося магнитного поля, разработал многофазные электрические машины и схемы распределения многофазных токов.

- Иван Осипович Доливо-Добровольский (1861-1919г.), создатель техники трёхфазного переменного тока. В 1888-1889г. изобрёл трёхфазный асинхронный двигатель, в 1891г. осуществил первую электропередачу трёхфазного тока. Его изобретения работают и сегодня.

1. Проблемы электроснабжения и потребления

В замкнутой электрической цепи под действием постоянного напряжения электроны (металлические проводники) начинают разгоняться, их скорость увеличивается до тех пор, пока разгоняющая сила не уравновесится тормозящей. Наличие тормозящей силы неоспоримо доказывается в опыте Мандельштама Леонида Исааковича и Папалески Николая Дмитриевича, в котором раскручивалось проводящее кольцо и резко тормозилось. После остановки кольца по нему некоторое время протекал электрический ток.

Тормозящая сила возникает при вхождении электрона в область притяжения ядра атома проводника и проявляется через тепловое излучение (нагрев). Энергия источника питания расходуется на компенсацию тормозящего воздействия. Потеря скорости электроном намного меньше его абсолютной скорости, поэтому при остановке кольца ток затухает. Энергия выхода электрона из области взаимодействия его с ядром атома и энергия, выделяемая при торможении, равны.

Этот процесс разгона и торможения хорошо моделируется на светоизлучающих диодах, где толщина р-п перехода может рассматриваться как сечение, через которое в единицу времени проходит n электронов, и которые тормозятся до полной остановки.

Полная энергия излучения светоизлучающего диода (СИД) равна:

$$E = n \cdot m\phi \cdot c^2; \quad m\phi = h / \lambda \cdot c$$

где

λ - длина $m\phi$ - масса фотона.

При энергии источника питания СИДа: $U = 1,8 \text{ В}$; $I = 0,02 \text{ А}$; $t = 1 \text{ с}$
длина волны излучения будет равна:

$$n \cdot h \cdot c / \lambda = U \cdot e \cdot n,$$

отсюда $\lambda = h \cdot c / e \cdot U$

где h – постоянная Планка ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ (Дж}\cdot\text{с)}$);

$$\lambda = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / (1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1,8) \approx 690 \text{ [Н}\cdot\text{м]}.$$

Полная скорость электрона:

$$\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot V_e^2 \cdot n = n \cdot m_e \cdot c^2 = n \cdot hc / \lambda$$

$$V_e = \sqrt{2 \cdot h \cdot c / \lambda \cdot m_e} = 10^6 \cdot 0,7953 \text{ м/с}$$

Длина волны $\lambda = 690 \text{ (Н}\cdot\text{м)}$ - красный свет, $U = 1,8 \text{ В}$ - напряжение источника питания, что соответствует серийным образцам. Абсолютная скорость электрона и величина потери скорости при торможении в данном случае равны или почти равны.

Что же происходит в электрическом проводнике заданной длины, сечения, материала и напряжения на его концах?

Полное количество электронов, участвующих в переносе электрической энергии в электрической цепи равно:

$$U_e \cdot e \cdot N = U \cdot e \quad (1)$$

где $N = n \cdot \ell_{np} / \ell_e$ - полное количество электронов;

$U_e \cdot e$ - работа выхода (торможения);

U - напряжение на концах проводника;

n - количество электронов, прошедших через сечение за единицу времени;

ℓ_{np} - длина проводника;

ℓ_e - длина пробега электрона.

$$N = I \cdot \ell_{np} / (e \cdot V_e) \quad (2)$$

где $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ [Кл]}$ - заряд электрона;

V_e - скорость электрона в электрической цепи.

$$\frac{1}{2} m_e \cdot \Delta V_e^2 = U_e \cdot e \quad (3)$$

где ΔV_e - изменение скорости электрона при торможении.

Таким образом,

$$\begin{cases} U_e \cdot e \cdot N = U \cdot e \\ U_e \cdot e = \frac{1}{2} m_e \cdot \Delta V_e^2 \\ N = I \cdot \ell_{np} / (e \cdot V_e) \end{cases} \quad \begin{cases} U_e = \rho_{om} \cdot e \cdot V_e / S \\ \Delta V_e = \sqrt{2U_e \cdot e / m_e} \\ \Delta V_e = \sqrt{2\rho_{om} \cdot e^2 \cdot V_e / (m_e \cdot S)} \end{cases}$$

Для определения абсолютной скорости электронов рассмотрим цепь переменного тока, учитывая разность электрического сопротивления переменному и постоянному току. Эта разность объясняется тем, что дважды за период все электроны N полностью тормозятся и изменяют направление своего движения на противоположное.

$$\frac{I^2 (R_a - R_{om}) \cdot t}{2 \cdot f} = \frac{1}{2} m_e \cdot V_e^2 \cdot N \quad (4)$$

и

$$V_e = I \cdot e \cdot (\rho_a - \rho_{om}) / (f \cdot S \cdot m_e), \quad (5)$$

где S - сечение проводника

ρ_a, ρ_{om} - удельное омическое сопротивление (a - активное), (om - омическое) соответственно переменному и постоянному току.

Тогда:

$$\Delta V_e = \sqrt{2 \cdot \rho_{om} \cdot e^3 \cdot I (\rho_a - \rho_{om}) / (S^2 \cdot m_e^2 \cdot f)} \quad (6)$$

$$N = \ell_{np} \cdot f \cdot S \cdot m_e / e^2 (\rho_a - \rho_{om}) \quad (7)$$

$$U_e = I \cdot \rho_{om} \cdot e^2 (\rho_a - \rho_{om}) / (S^2 \cdot m_e \cdot f) \quad (8)$$

$$V_e = I \cdot e (\rho_a - \rho_{om}) / (f \cdot S \cdot m_e) \quad (9)$$

Для наглядности вычислим ΔV_e , V_e , N и U_e для алюминиевого электропроводника:

$$I = 40 \text{ А}; S = 10^{-5} \text{ м}^2; \ell_{np} = 10^3 \text{ м}; R_a = 3,12 \text{ [Ом]}; R_{om} = 2,87 \text{ [Ом]},$$

$$\rho_a = 3,12 \cdot 10^{-8} \text{ [Ом} \cdot \text{м]}; \rho_{om} = 2,87 \cdot 10^{-8} \text{ [Ом} \cdot \text{м]}; R_m = R_{20} \cdot 1,2; T_{np} = 70^\circ \text{C}; f = 50 \text{ Гц}$$

где T_{np} - температура жил электропроводника.

$$\Delta V_e = 9,05 \cdot 10^{-2} \text{ [м/с]};$$

$$V_e = 4,22 \cdot 10^7 \text{ [м/с]};$$

$$N = 5,9162 \cdot 10^{15};$$

$$U_e = 2,33 \cdot 10^{-14} \text{ [В]}.$$

Важно понимать, что при изменении полярности напряжения питания электрический ток движется против действия электрического поля и то, что в этом случае создаётся дополнительный вращающийся момент на валу генератора, - значения никакого не имеет! Тормозящиеся электроны раскручивают вал генератора, но при этом излучают тепловую энергию, которая дважды за период отнимается от энергии горения сырья для их разгона.

Минимальные потери энергетического сырья при передаче электрической энергии переменного тока составляют для медных проводников - 4%, для алюминиевых проводников - 8%, и определяются как их собственные индуктивности, пропорциональные разности активного и омического сопротивлений.

Ещё более удручающая картина предстаёт на фоне динамики потребления, в которой доля электроприёмников индуктивного характера подавляющая.

Проанализируем работу трансформатора (рис.1).

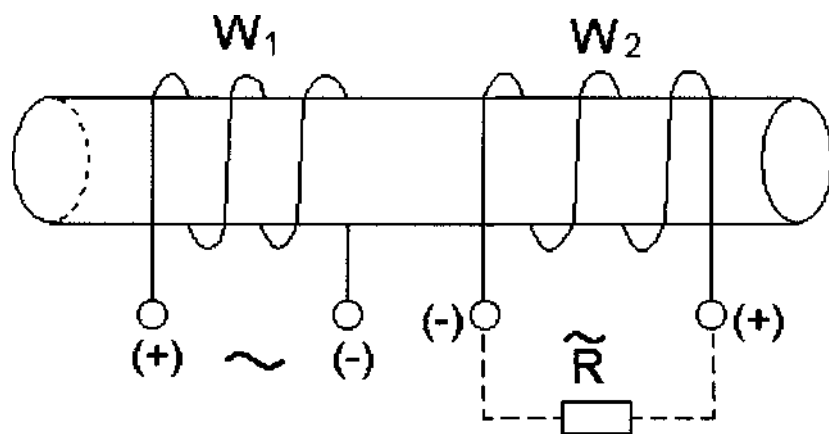


Рис.1

Протекающий по первичной обмотке (W_1) трансформатора электрический ток увлекает электроны в доменах ферромагнитного материала, которые синхронно движутся в своих доменах по эквипотенциальным орбитам. Это и позволяет постоянным магнитам сохранять намагниченность без потерь. Работа выхода ($Ue \cdot \dot{e}$) электрона на орбите равна нулю. Если изоляция между доменами отсутствует, то возникают вихревые токи, проходящие по всему объёму, металл нагревается и не имеет остаточной намагниченности. Синхронность движения электронов в доменах подразумевает исключение взаимного воздействия между доменными электронами, которая может быть нарушена при ударе или при нагреве до точки Кюри.

Энергия кинетического движения электронов в ферромагнитном материале увлекает электроны во вторичной обмотке (W_2) трансформатора, поляризуя её (рис.1). Вектор электродвижущей силы противоположен вектору приложенного напряжения.

При замыкании вторичной обмотки на активную нагрузку ампервитки обеих обмоток складываются, увлечение электронов в доменах и их скорость увеличиваются, что приводит к увеличению скорости электронов в первичной обмотке и соответственно к увеличению тока в первичной цепи.

При ёмкостной нагрузке во вторичной обмотке на конденсаторе возникает электродвижущая сила поляризации диэлектрика, а при индуктивной электродвижущая сила индукции, которые по полярности противоположны. Это объясняет опережающий характер тока нагрузки при включении в электрическую цепь конденсатора и отставание при включении индуктивности.

Эквивалентная схема трансформатора показана на рис. 2.

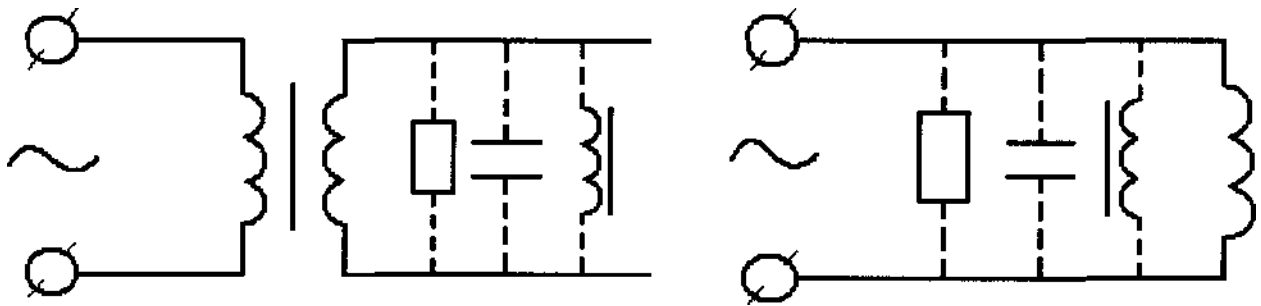


Рис.2

Системы электроснабжения и потребления связаны именно таким кластером.

Чем больше нагрузка потребителей, тем больше параллельных цепей, тем больше ток, тем больше электронов участвующих в передаче электрической энергии ($N = (\ell_{\text{пр}} \cdot S) \cdot f \cdot m_e / e^2(\rho_a - \rho_{\text{ом}})$), тем больше их абсолютная скорость, тем ниже энергоэффективность систем электроснабжения.

Для повышения энергоэффективности необходимо:

1. уменьшить ток нагрузки потребителя;
2. уменьшить объём электропроводников ($\ell_{\text{пр}} \cdot S$) электроснабжения (децентрализация электросистемы);
3. увеличить электропроводимость всей электросистемы.

Текущую энергоэффективность любой электрической системы можно достоверно оценить по величине и динамике изменений циркулирующей по ней реактивной энергии. Самое лучшее, идеальное — это полное её обнуление во всём объёме электрической системы.

Единственно верным схемнорежимным решением является шунтирование импульсов тока нагрузки и компенсация реактивной энергии каждого электроприёмника, приводящее к увеличению электропроводимости всей электросистемы и за счёт уменьшения тепловой напряжённости, и за счёт снижения мгновенной плотности тока, как в сетях, так и в генераторах.

II. Анализ систем электросбережения

Энергосберегающий потенциал индивидуального шунтирования импульсов тока нагрузки и компенсации реактивной энергии переоценить невозможно.

Рассмотрим пример электроснабжения, анализирующий действие импульса тока и реактивной энергии электроприёмника.

Электродвигатель однофазный потребляет за 1 сек:

$$W_a = 2200 = 220 \cdot 10 \cdot 1 \text{ [Дж]} \quad - \text{ активная электроэнергия};$$

$$W_p = 2200 = 220 \cdot 10 \cdot 1 \text{ [Вар}\cdot\text{с]} \quad - \text{ реактивная электроэнергия};$$

$$W_n = 220 \cdot 14,142 \cdot 1 = 3111,27 \text{ [ВА}\cdot\text{с]} \quad - \text{ полная электрическая энергия.}$$

$$R_{сети} = 1 \text{ Ом}$$

$$\text{Сетевые потери: } W_c = 14,142^2 \cdot 1 \cdot 1 = 200 \text{ [Дж].}$$

Нагрузка электродвигателя изменилась и ему для совершения работы требуется столько же энергии, но за 0,1 сек, а не за 1 секунду. Тогда:

$$W_n = 220 \cdot 14,142 \cdot 1 = 220 \cdot 141,42 \cdot 0,1 = 3111,27 \text{ [ВА}\cdot\text{с]}$$

$$\text{Сетевые потери: } W_c = 141,42^2 \cdot 1 \cdot 0,1 = 2000 \text{ [Дж]}$$

Зашунтируем реактивную энергию, тогда:

$$W_n = W_a = 220 \cdot 10 \cdot 1 = 2200 \text{ [Дж]}$$

$$W_c = 10^2 \cdot 1 \cdot 1 = 100 \text{ [Дж]}$$

В режиме импульса нагрузки

$$W_n = W_a = 220 \cdot 100 \cdot 0,1 = 2200 \text{ [Дж]}$$

$$W_c = 10^4 \cdot 1 \cdot 0,1 = 1000 \text{ [Дж]}$$

Шунтирование реактивной энергии в обычном режиме экономит 100 Дж, а в режиме импульса 1000 Дж.

Возникает вопрос, а какова будет экономия, если импульс нагрузки сдмпфировать техническим устройством, обеспечивающим электроприёмник в заданный отрезок времени (0,1 с) необходимой энергией?

Понятно, что чем меньше электроудалённость от источника питания, тем надёжнее электроснабжение, меньше падение напряжения (падение напряжения потребует ещё большего импульса тока, так как двигатель является стабилизатором мощности. Уменьшите величину питающего напряжения и ток увеличится. Проверьте!) Сможет ли этот импульс сдмпфировать синхронный или тиристорный компенсатор? Ответ - нет! Остаются конденсаторы - источники тока и стабилизаторы напряжения. Синхронные компенсаторы являются источниками напряжения и потому не прореагируют на импульс. Тиристорные компенсаторы являются регулируемыми активными сопротивлениями и не имеют собственного "запаса" электрической энергии.

Конденсатор наполовину, а то и более срежет импульс тока, дополнительно экономя 750 [Дж].

Подведём итог энергосберегающей технологии: 250 Дж вместо 2000 Дж - 87,5% экономии, 100 Дж в обычном режиме, вместо 200 Дж - 50%. Энергосберегающий потенциал переоценить невозможно!

Логично задаться вопросом: "Почему конденсаторные установки, при всех своих функциональных возможностях не подтверждают на практике энергоэффективную значимость?"

Схемной ошибкой компенсации реактивной энергии является общая, узловая компенсация, которая, шунтируя некий сетевой кластер, не изменяет коэффициент мощности внутри кластера, не демпфирует с достаточной динамикой индивидуальные импульсы нагрузки. Более того, узловые, общие конденсаторы реактивной энергии взаимодействуют не только с внутренними, но и с внешними контурами электрической системы. Взаимодействие с внешним контуром сетей происходит в режиме резонанса напряжений, что определяет большие сетевые потери. Регулировка коэффициента мощности таких сетей затруднительна, если не более. Наблюдается не функциональное увеличение плотности тока, загрузка генерирующих мощностей и т.д. Это слишком большая цена за стабилизацию напряжения в заданной точке общего присоединения.

Техническим недостатком существующих конденсаторных установок являются собственно сами конденсаторы. Стремление уменьшить объём конденсатора и увеличить его ёмкость привело к тому, что тепловой режим внутри конденсатора при его работе приводит к значительному нагреву диэлектрика, омическое сопротивление которого очень сильно зависит от температуры и может превышать номинальное значение на порядок даже при незначительном повышении температуры на поверхности. Площадь поверхности конденсатора, отнесенная к его ёмкости с увеличением ёмкости современных косинусных конденсаторов неуклонно уменьшается, что не обеспечивает необходимой динамики теплообмена. Более того, сила, сжимающая диэлектрик при работе конденсатора в сетях переменного тока, прямо пропорциональна ёмкости и кроме генерации тепловой энергии дополнительно генерирует звуковые колебания.

Суммируя недостатки современных конденсаторных устройств выделим главные:

- повышенные сквозные токи через диэлектрик из-за большого температурного перепада внутреннего объёма и поверхности конденсатора;
- малая площадь поверхности теплообмена относительно номинальной ёмкости;
- дополнительный нагрев, возникающий при сжатии пластин. Сила сжатия пропорциональна ёмкости;
- акустические потери, пропорциональные ёмкости, увеличивающие тепловые потери;

Реальный тангенс потерь современных конденсаторных установок, не отнесенный к идеальным условиям работы, колеблется в пределах 5% - 10% от

величины прокачиваемой реактивной энергии, а наличие в сетях высших гармоник тока (частотный привод, сварка, индукционные печи, дуговая плавка, электронные преобразователи) доводит его до уровня аварийного режима.

Ш. Фильтрующий конденсатор с токодемпфирующими функциями (ФКТФ). Назначение, принцип действия, области применения, функциональные приоритетные категории

1. Назначение

ФКТФ предназначен для шунтирования импульсов тока нагрузки электроприёмника и компенсации его реактивной энергии индуктивного характера.

ФКТФ является установкой индивидуального пользования, подключается к каждому электроприёмнику индуктивного характера (асинхронные двигатели, трансформаторы и т.д.).

2. Устройство и принцип действия

Конденсатор собирается на платах, состоит из множества параллельных LC цепей. Тангенс потерь одной LC цепи и собственно самого ФКТФ не более 10^3 . Платы размещены в корпусах. ФКТФ включается через автоматы защиты, имеет световую сигнализацию. Выполняется под любую степень защиты, во взрывозащищённом исполнении, с самовентиляционным эффектом, до напряжения 35 кВ.

Расчёт параметров LC цепочек учитывает режимы работы электроприёмника (сварка, дуговая плавка, индукционная печь, переменная нагрузка электродвигателя и т.д.) и его технические параметры.

Индуктивности каждой секции собираются на общем магнитопроводе (феррит), обеспечивая демпфирование, как токов зарядки, так и напряжения питания электроприёмника.



Рис.3

3. Размещение и монтаж

ФКТФ размещается в непосредственной близости и подключается после коммутационной аппаратуры параллельно электроприёмнику.

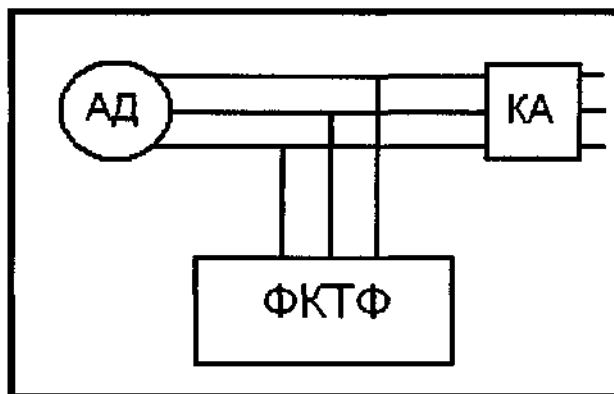


Рис.4

4. Основные функциональные приоритетные категории

- Повышение эксплуатационного КПД и, как следствие, снижение потребления активной энергии от 5% до 40% самим электроприёмником в зависимости от режимов работы.
- Поддержание коэффициента мощности в пределах 0,99 - 1 при переменной нагрузке и колебаниях напряжения питания.
- Защита коммутационной аппаратуры, изоляции обмоток от токов электромагнитной индукции при коммутациях. Снижение токов нагрузки при пусках.
- Шунтирование импульсов тока нагрузки, токов высших гармоник. Уменьшение вибрации электродвигателей.
- Снижение сетевых потерь в сетях как предприятий, так и электросистемы в целом от 2 до 10 раз.
- Снижение тепловой напряжённости электросистемы, что особенно актуально при повышении температуры окружающей среды и ухудшении процессов теплообмена.
- Снижение уровня электромагнитных помех в сетях (ниже уровня ПДУ в несколько раз).

5. Области применения ФКТФ

- Трансформаторы и электродвигатели.
- Системы электрической плавки и сварки, индукционные печи.
- Электропоезда и электровозы.
- Тяговые подстанции железных дорог.
- Выпрямительные установки сетей постоянного тока.
- Осветительное оборудование.

6. Технические характеристики ФКТФ:

- ФКТФ соответствует ТУ 190837713.001-2007 «Фильтрующий конденсатор сборный с токодемпфирующими функциями»; номинальное напряжение - до 35кВ; частота питающей сети - 50 Гц; степень защиты - под заказ; климатическое исполнение - под заказ.

IV. Методика расчёта экономической эффективности ФКТФ

Работа всех элементов систем электроснабжения предприятий, таких как: трансформаторы, линии электропередач(0,4, 6 и 10 кВ), токоограничивающие реакторы, выпрямительные установки невозможна без потерь активной электрической энергии (мощности).

Элементы систем электроснабжения предприятий рассчитываются по экономической плотности тока и нагреву от токовых нагрузок.

Значения экономической плотности тока, рекомендуемые ПУЭ, относятся в основном к сетям более 1 кВ и находится в пределах 2,7/1 [А/мм²] (Си/А1).

Значения токовых нагрузок по нагреву относятся к сетям до 35 кВ, для которых допустимая температура жил находится в пределах (5(Н80) °С.

В таблице 1 представлены данные по сетевым потерям активной электрической мощности на одном погонном метре электропроводника.

Расчёт токовых нагрузок проведён по допустимому нагреву (70 °С) без учёта толщины и материала изоляции, поэтому плотность тока занижена.

К - коэффициент теплоотдачи принят равным 10 [Вт/м² • °С], температура окружающей среды $T_{cp} = 20^{\circ}\text{C}$.

$$T_{np} = \frac{I^2 \cdot R_{20} (1 - \alpha \cdot 20) + K \cdot A \cdot T_{cp}}{(K \cdot A - I^2 \cdot \alpha \cdot R_{20})} \quad (10)$$

$$I = \sqrt{\frac{K \cdot A \cdot (T_{np} - T_{cp})}{R_T}} \quad (11)$$

где T_{np} - температура жилы электропроводника;
 A - площадь поверхности электропроводника;
 R_T - активное сопротивление нагретого электропроводника;
 α - температурный коэффициент сопротивления.

Сетевые потери активной мощности вычислялись по формуле

$$P_c = I^2 \cdot R_{20} \cdot 1.2 \cdot 10^{-3} [BT] \quad (12)$$

Таблица 1. Данные по сетевым потерям активной электрической мощности на одном погонном метре электропроводника

Площадь сечения электропроводника $S \cdot 10^{-6} [m^2]$	Площадь поверхности 1 погонного метра электропроводника $X \cdot 10^{-3} [m^2]$	Электрическое сопротивление току 1 погонного метра Al/Cu. $T_{пр} = 20^\circ C, R_{20} 10^{-3} [OM]$		Индуктивное сопротивление току 1 погонного метра электропроводника $X_L \cdot 10^{-3} [OM]$	Длительно допустимый ток $T_{пр} = 70^\circ C, T_{ср} = 20^\circ C$ $R_T = R_{20} \cdot 1,2 [A], Al/Cu$	Сетевые потери активной электрической мощности на 1 погонном метре электропроводника в сетях 0,4 кВ [Вт] Al/Cu
		Переменный ток	Постоянный ток			
1	3,545	31,2/18,5	28,7/17,8	0,11	6,9/8,9	1,783/1,7585
1,5	4,342	20,8/12,3	19,13/11,87	0,108	9,3/12,1	2,159/2,161
2,5	5,605	12,5/7,4	11,48/7,12	0,104	13,7/17,8	2,815/2,814
4	7,09	7,81 /4,63	7,18/4,45	0,095	19,5/25,3	3,564 / 3,556
6	8,7	5,21 /3,07	4,8/2,97	0,09	26,4 / 34,3	4,3574 / 4,362
10	11,21	3,12/1,84	2,87/1,78	0,073	38,7 / 50,4	5,607 / 5,608
16	14,18	1,950/1,16	1,8/1,1125	0,0675	55/71,30	7,0785 / 7,0765
25	17,73	1,25/0,74	1,15/0,712	0,0662	76,9/100	8,870/8,880
35	21	0,894 / 0,53	0,82/0,51	0,0637	99/128,5	10,515/10,502
50	25,1	0,625 / 0,37	0,574 / 0,356	0,0625	129,4/168	12,558/12,531
70	29,66	0,447 / 0,265	0,41 / 0,2543	0,0612	166,5/216,2	14,870/14,864
95	34,6	0,329/0,195	0,302/0,1874	0,0602	209,4 / 272	17,311 /17,312
120	39	0,261/0,154	0,24/0,1483	0,0601	249,5 / 324	19,497/19,400
150	43,42	0,208/0,124	0,1913/0,119	0,0596	294,9 / 383	21,707/21,827
185	48,22	0,169/0,1	0,155/0,0962	0,0593	345,2 / 448	24,166/24,085
240	55	0,13/0,077	0,1196/0,074	0,0587	419,5/545	27,453 / 27,445

Сетевые потери, учитывающие общее падение нагрузки и изменение теплового режима вычисляются по формуле:

Формула (13) может быть развёрнутой

$$P_c = (I_1^2 \cdot R_{T1} - I_2^2 \cdot R_{T2}) = R_{20} [(I_1^2 - I_2^2) + \alpha(I_1^2 \cdot T_1 - I_2^2 \cdot T_2) - \alpha \cdot 20 \cdot (I_1^2 - I_2^2)]$$

где T_1 - температура жил электропроводника без ФКТФ;
 T_2 - температура жил после подключения ФКТФ.

Расчёт экономии активной мощности

Этап 1. Измерение электрических параметров без ФКТФ

- Определение среднего значения тока за период по показателям счётчика активной и реактивной энергии.
- Определение среднего значения напряжения за период по показателям Вольтметра.
- Определение температуры жил электропроводника за период по показателям пирометра, термометра.

Этап 2. Измерение электрических параметров после подключения ФКТФ

Этап 3. Расчёт экономии активной мощности

- Определение полной мощности:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [\text{В} \cdot \text{А}] \quad (15)$$

Для этого показания счётчика активной и реактивной энергии делят на время периода и определяют среднее значение активной (P) и реактивной (Q) мощностей.

- Определение полного тока

где U_{ϕ} - фазное напряжение среднее за период

$$I_n = S / 3 \cdot U_{\phi} \quad [\text{А}] \quad (16)$$

- Определение текущего коэффициента мощности

$$\cos \varphi = P / S$$

- Определение экономии активной мощности электроприёмником, Рэп

По показаниям счётчика активной энергии.

- Определение экономии активной мощности в сетях предприятия от электроприёмника до точки коммерческого учёта

По фидеру определяется длина линий 0,4, 6, 10 кВ, сечение кабелей. По таблице 1 определяется активное сопротивление с учётом температуры.

$$P_c = (I_1^2 \cdot R_{r1} - I_2^2 \cdot R_{r2}) \cdot 3$$

Замеры температуры достаточны для линий 0,4 кВ.

- Определение величины скомпенсированной реактивной мощности, $Q_{ск}$.

По показаниям счётчика реактивной энергии.

- Определение экономии активной мощности в трансформаторах.

Экономия активной мощности в трансформаторах определяется по формулам:

$K_{з.э}$ - потери активной мощности в трансформаторе без ФКТФ;

ΔP_{T2} - потери активной мощности в трансформаторе после подключения ФКТФ;

ΔP_T - экономия активной мощности в трансформаторе;

ΔP_a - потери активной мощности;

$\Delta P_{пр}$ - приведённые потери активной мощности трансформатора.

коэффициент загрузки, как отношение значения текущей полной мощности к номинальной.

$\Delta P_{кз}$ - активные потери мощности короткого замыкания трансформатора (паспортные данные)

$$\begin{cases} \Delta P_{пр} = \Delta Q \cdot K_{пр} \\ \Delta Q = K_{з.э} \cdot \Delta Q_{к.з} \\ \Delta Q_{к.з} = S_H \cdot (U_{к.з.}/100) \end{cases} \quad (19)$$

(Режим холостого хода трансформатора не рассматривается!)

ΔQ - потери реактивной мощности в трансформаторе;

$K_{пр}$ - переводной эквивалент реактивной мощности, кВт/кВар (принимается = 0,07);

$U_{к.з.}$ - напряжение короткого замыкания (паспортные данные);

$\Delta Q_{к.з}$ - потери реактивной мощности короткого замыкания.

$$\begin{aligned} \Delta P_{тв} &= \Delta P_{T1} - \Delta P_{T2} = \\ &= [(S_{T1}^2 - S_{T2}^2) \cdot \Delta P_{к.з.} / S_H^2 + (S_{T1} - S_{T2}) \cdot K_{пр} \cdot U_{к.з.} / 100] \text{ (кВт)}, \text{ где} \quad (20) \end{aligned}$$

S_{T1} - текущая полная мощность без ФКТФ;

S_{T2} - текущая полная мощность с ФКТФ;

- Определение суммарной экономии активной мощности:

$$\Sigma \Delta P = (\Delta P_{эл} + \Delta P_c + \Delta P_T) \text{ (кВт)}$$

Расчёт экономической эффективности ФКТФ

$$\mathcal{E} = \Sigma \Delta P \cdot t \cdot K_u \text{ [кВт}\cdot\text{ч]}$$

где K_u - коэффициент использования;

t - время работы электроприемника;

$\Sigma \Delta P$ - величина суммарной активной мощности, выведенная из баланса предприятия;

\mathcal{E} - экономия активной электрической энергии за период использования электроприемника.

**Определение экономического эффекта от внедрения ФКТФ
АКТ испытаний ФКТФ
(Фильтрующего конденсатора с токодемпфирующими функциями)
на электродвигателе 45 кВт лесопильной рамы Р63-4Б, инв. № 59103**

Таблица 1. Сравнительные экспериментальные замеры потребления электрической энергии на электроприводе лесопильной рамы Р 63-4Б, инв. № 59103 без ФКТФ и с ФКТФ.

№	Замеренные параметры	Обо значения	Единица измерения	Без ФКТФ	С ФКТФ
1	Линейное напряжение		В	381	384
2	Время периода работы		ч	1,0	1,0
3	Активная энергия		кВт-ч	17,82	10,05
4	Реактивная энергия		кВАр-ч	23,76	0
5	Полная энергия		кВА-ч	29,7	10,05
6	Коэффициент мощности		-	0,6	1,0
7	Температура жил электропроводника		°С	T ₁ = 33,04	T ₂ = 17,57
8	Температура окружающей среды над поверхностью проводника		°С	18	16
9	Площадь сечения проводника (алюминий)		мм ²	25	25
10	Площадь поверхности проводника на 1 метре длины		м ²	17,73*10 ³	17,73*10 ³
11	Активное сопротивление проводника длиной 1 м при его температуре		Ом	1,3152*10 ³	1,238*10 ³
12	Средний ток нагрузки		А	45	15,11
13	Длина сетей 0,4 кВ	Рс/0.4	м	250	250
14	Длина сетей 10 кВ	Рс/10	м	1000	1000
15	Сетевые потери по 0,4 кВ		кВт	1,9975	0,2120
16	Сетевые потери по 10 кВ		кВт	0,32	0,034
17	Потери активной мощности в трансформаторе ТНЗ-1000/10	ΔР _{Т1}	кВт	5,045	4,7316
18	Потери активной мощности в трансформаторе ТНЗ-40000/10	ΔР _{Т2}	кВт	246,0552	245,8035
19	Баланс активной мощности		кВт	271,2377	260,8311
Σ ΔР = -10,4066 кВт					

Где:

Сетевые потери по 0,4 кВ

$$P_{C/0,4} = 3 \cdot 250 \cdot 1,3152 \cdot 10^{-3} \cdot 250 = 2,0 \text{ [кВт]} \quad \text{- без ФКТФ}$$

$$P_{C/0,4} = 3 \cdot 250 \cdot 1,238 \cdot 10^{-3} \cdot 250 = 0,212 \text{ [кВт]} \quad \text{- с ФКТФ}$$

Сетевые потери по 10 кВ в 25 раз меньше, чем по 0,4 кВ и с учетом длины проводника составят:

$$P_{C/10} = 0,32 \text{ [кВт]} \text{ без ФКТФ} \quad \text{и} \quad P_{C/10} = 0,034 \text{ [кВт]} \text{ с ФКТФ}$$

Потери активной мощности в трансформаторах:

$$\Delta P_{T1} = [\Delta P_{K3} \cdot S_{T1}^2 / S_N^2 + K_{ГР} \cdot U_{K3} \cdot S_{T1} / 100] \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{T2} = [\Delta P_{K3} \cdot S_{T2}^2 / S_N^2 + K_{ГР} \cdot U_{K3} \cdot S_{T2} / 100] \text{ кВт}$$

Паспортные данные по трансформатору ТНЗ-1000/10:

$$\Delta P_{K3} = 12,2 \text{ кВт};$$

$$U_{K3} = 5,7 \text{ В};$$

$S_{T1} \approx 500 \text{ кВА}$ – по текущей нагрузке.

Паспортные данные по трансформатору ТНЗ-40000/10:

$$\Delta P_{K3} = 170,62 \text{ кВт};$$

$$U_{K3} = 10,99 \text{ В};$$

$S_{T1} \approx 24000 \text{ кВА}$ – по текущей нагрузке.

Суммарная экономия активной мощности получена из баланса активных мощностей (без ФКТФ - с ФКТФ) и равна $\Sigma \Delta P = 10,4 \text{ кВт}$.

Предприятие работает в две смены.

Число рабочих дней в году - 253.

Коэффициент использования оборудования - 0,5.

Экономический эффект в кВт·ч за год составит:

$$\mathcal{E} = \Sigma \Delta P \cdot t \cdot K_{И} = 10,4 \cdot 16 \cdot 253 \cdot 0,5 = 21050 \text{ (кВт·ч)}$$

Суммарная экономия активной мощности состоит из:

где

$$\begin{aligned} \Delta P_{ЭП} &= 7,77 \text{ кВт} - \text{электроприемник}; \\ \Delta P_{C/0,4} &= 1,7855 \text{ кВт} - \text{сеть } 0,4 \text{ кВ}; \\ \Delta P_{C/10} &= 0,2860 \text{ кВт} - \text{сеть } 10 \text{ кВ}; \\ \Delta P_{T/1000} &= 0,3134 \text{ кВт} - \text{трансформатор}; \\ \Delta P_{T/40000} &= 0,2517 \text{ кВт} - \text{трансформатор}. \end{aligned}$$

При коэффициенте использования $K_{И} \sim 1$ и трехсменной работе (вентиляция, насосы) и даже без учета экономии активной мощности электроприемником, экономия активной энергии в год составит:

$$\mathcal{E} = 2,6366 \cdot 8760 = 23100 \text{ (кВт·ч)}$$

Выводы:

1. ФКТФ позволяет снизить потребление полной мощности предприятий и, за счет снижения плотности тока в сетях электрической системы, почти в несколько раз разгрузить генерирующие мощности.

Такое значительное снижение общей нагрузки генераторов обусловлено шунтированием максимальных значений токов активной энергии и полной компенсацией токов реактивной энергии электроприемников (в том числе и трансформаторов).

2. ФКТФ, являясь индивидуальным источником питания, косвенно децентрализует единую электросистему, повышает эксплуатационный КПД и энергоэффективность электроприемников.

3. ФКТФ обеспечивает реальное снижение температуры электропроводников от 33°C до 17,6°C и корпуса электродвигателя от 65°C до 30°C (в акте данные по температуре корпуса электродвигателя не приведены). что является неоспоримым аргументом как для энергетиков, так и для экономистов.