

В.В. Артемьев, канд. тех. наук, В.В. Луханина

(Украина, Запорожье, Запорожская государственная инженерная академия)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЕКТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Современный уровень развития силовой электроники (преобразовательной техники), программных и аппаратных средств управления обеспечивают технические предпосылки широкого внедрения многофункциональных, широкорегулируемых, надежных вентильных электроприводов переменного тока, которые по техническим показателям не уступают вентильным приводам постоянного тока, а по экономическим, как правило, превосходят их. Преобразовательная часть таких приводов выполнена на полностью управляемых (запираемых) вентилях.

Основным сдерживающим фактором широкого применения универсальных по своим возможностям современных преобразовательных установок продолжает оставаться нехватка свободных финансовых средств у предприятий. С другой стороны, многообразие вариантов технических решений, направленных на повышение энергоэффективности электромеханических систем, обеспечивающих тот или иной технологический процесс, требует достаточной аргументации при выборе критериев эффективности рассматриваемых вариантов. Кроме объективности самой оценки этим будет обеспечена возможность ограничиться не самым сложным вариантом преобразовательной части привода, приняв, например, простые варианты регулируемого напряжением привода переменного тока или даже нерегулируемого, но с управляемым пуском.

В простых случаях, когда речь идет о сравнении способов управления приводом, например, между вариантами энергетической оптимизации при регулировании напряжения на статоре двигателя в функции переменной нагрузки (достижение минимума потерь, минимума потребляемого тока, максимума КПД) [1,2] выбор режима управления может быть произведен, как это предложено в [3], по критерию минимума стоимостного часового потребления полной энергии двигателя. Очевидно, что такой подход к оценке эффективности режима управления приводов допустим при несущественности отличия по вариантам управления показателей технологического процесса, малом влиянии режима работы преобразовательной части привода на потери в электроснабжающей линии и искажение формы питающего напряжения. Сказанное относится и к оценке вариантов частотно-управляемых приводов [4] при названных ограничениях влияния этих вариантов управления на ход технологического процесса и степень влияния преобразователя частоты на показатели работы электроснабжающей линии.

В более общих случаях приходится сравнивать варианты, связанные с заменой нерегулируемого привода на регулируемый. Здесь традиционно подход к оценке вариантов предусматривает, как правило, сравнение приведенных за-

трат, зависящих от начальных капиталовложений, нормативного срока их окупаемости и эксплуатационных расходов. При равных базовых капитальных затратах в вариантах на преобразовательную часть некоторые специалисты предлагают пользоваться показателем ежегодных приведенных затрат электродвигателя (ПЗ) со структурой затрат:

$$ПЗ = (C_{ЭД} + C_{КУ}) \cdot [1 + T_H (K_A + K_{ОБ})] + C_A, \quad (1)$$

где $C_{ЭД}, C_{КУ}$ – соответственно стоимость электродвигателя и компенсирующего устройства, обеспечивающего достижение у привода нормативного значения $tg\varphi=0,484$; K_A – доля затрат на амортизацию; $K_{ОБ}$ – нормативная доля затрат на обслуживание при эксплуатации; C_A – стоимость потерь энергии в двигателе, определяемая фактическим значением КПД двигателя; T_H – нормативный срок окупаемости двигателя (обычно 5 лет).

Недостаток показателя (1) очевиден, он не учитывает стоимость дополнительных ремонтов и затрат на восстановление электрооборудования, вызванных некачественностью потребления (преобразования) электроэнергии в преобразовательной части системы (привода). Нельзя считать оптимальным вариант, при котором минимальные затраты энергии будут достигнуты за счет ухудшения режимов работы электрооборудования (в первую очередь электромеханического преобразователя).

Потребители в силу присущих им характеристик влияют на питающую энергосистему, причем упомянутое влияние зависит от показателей качества преобразования энергии как отдельно взятым потребителем, так и их результирующим действием.

Возможность определения показателей качества преобразования энергии и, особенно, его составляющих, позволяет установить технико-экономические показатели электротехнических установок и комплексов, реализовать мероприятия по эффективному использованию оборудования.

Отличие качества потребляемой энергии и качества процессов преобразования вызвано теми обстоятельствами, что традиционно качество потребляемой энергии определяется в узле нагрузки, например, на подстанции, питающей несколько, иногда большое число потребителей. Определение же показателей качества потребления энергии не регламентировано.

Очевиден факт, что обобщенный показатель качества электроэнергии не дает представления о характеристиках энергопотребления отдельно взятых потребителей. В этой связи становится очевидной необходимость оценивания показателей качества преобразования мощности, прежде всего электромеханическими преобразователями, являющимися основой современных систем электропривода. Очевидно также и то, что каждый из преобразователей энергии имеет свои показатели, причем их структура зависит от характера физических процессов, лежащих в основе процессов преобразования энергии.

Из сказанного следует, что показатели качества преобразования энергии, как и показатели качества потребляемой энергии, в количественном отношении

соответствуют достигнутому уровню развития техники, технологии измерения энергетических параметров, математического аппарата, описывающего упомянутые процессы. Изменение показателей некачественности преобразования приводит к изменению энергетических воздействий, их интенсификации, повышенному, ускоренному старению электрической машины.

Можно утверждать, что ускоренный износ электротехнического агрегата вызван отклонениями показателей преобразования энергии от запланированных конструктивными особенностями этого агрегата и некачественность преобразования энергии является причиной быстрой (ускоренной) деградации электромеханического преобразователя. В сложившейся практике, при классификации причин, вызывающих из строя электрических машин, указывают две из них – механические, связанные, в основном, с выходом из строя подшипников и замыкания, связанные с разрушением изоляции [5].

Конкретным примером оценки влияния некачественности преобразования электроэнергии в питающем двигателе автономном инверторе напряжения и самом двигателе являются эмпирические коэффициенты $K_{Э1} = F_1(p, f_2)$, $K_{Э2} = F_2(p, f_2)$, определяющие степень снижения располагаемой полезной мощности P_2 синхронного двигателя серии 4А от числа пар полюсов p и выходной частоты f_2 инвертора с амплитудным регулированием [6]:

$$P_2 = K_{Э1} \cdot K_{Э2} \cdot P_{КАТ}, \quad (2)$$

где $P_{КАТ}$ – каталожная (номинальная) мощность на валу.

В [7] предложено расчетное выражение для оценки ущерба, обусловленного дополнительными потерями мощности и сокращением срока службы изоляции электрооборудования, вследствие действия высших гармоник напряжения, основанное на использовании статистических коэффициентов.

В работе [5] обозначен полный спектр показателей качества энергопреобразования для трехфазного асинхронного двигателя, а в [8] предложена математическая интерпретация набора показателей такого рода. Из этого набора такие показатели, как

- коэффициент эффективности использования потребляемой энергии;
- коэффициент неравномерности тепловыделения и токовой загрузки фаз;
- коэффициенты вариации момента и некачественности его преобразования;
- коэффициент ухудшения вибрационных характеристик,

напрямую связаны с качеством подаваемого на двигатель напряжения и могут быть положены в основу системы оценки вероятности безотказной работы двигателя, срока службы двигателя, а, следовательно, и ремонтных затрат.

Согласно межгосударственного стандарта ГОСТ 13109–97 нормально допустимое значение коэффициента несинусоидальности напряжения – $K_{нс}$, обусловленного наличием в напряжении высших гармоник и характеризующего искажение кривой напряжения сетей общего назначения на выводах электроприемников напряжением 0,38 кВ ограничивается 8% с интегральной вероятностью 0,5% за время измерения.

В конкретных случаях для шин питания мощных нелинейных и(или) рез-копеременных нагрузок, подключенных по схемам глубокого ввода (шины преобразователей прокатных станков, дуговых электропечей и.т.п.), допустимую несинусоидальность устанавливают исходя из условий нормальной работы преобразователей. С этим связано ограничение несинусоидальности на более высоких уровнях напряжения в стандартах некоторых стран.

Так, по данным [4] в Швеции для сетей 0,25–0,43 кВ допустимое значение $k_{нс}$ соответствует 4%, для сетей 3,3–24 кВ–3%, 36–72 кВ – 2%, выше 84кВ – 1%. В Японии для сетей 1 – 66 кВ и больше – соответственно 2 и 1%. По ГОСТ 13109-97 нормально допустимое значение $K_{нс}$ для сетей 6-20 кВ соответствует 5%, 35 кВ-4%;110-330 кВ-2%.

Именно для случаев индивидуального подключения преобразовательной техники с наибольшей достоверностью может быть выделена доля затрат, необходимых для достижения допустимого уровня искажающего влияния на сеть (минимального уровня электромагнитной совместимости с сетью) в сравниваемых вариантах преобразователей и способов управления ими.

С учетом изложенного в структуре показателя (1) должна появиться составляющая, связанная с компенсацией ущерба, вызванного некачественным преобразованием энергии в силовом тракте электропривода, а вместо стоимости компенсатора реактивной мощности $C_{КУ}$ должна присутствовать стоимость функционального полного компенсатора неактивных составляющих полной мощности – $C_{КНС}$. Такие компенсаторы выполняют на основе силовых активных фильтров (САФ), и называют силовыми активными компенсаторами (САК). Активный фильтр состоит из преобразователя переменного/постоянного тока, выполненного на ключах с двухсторонней проводимостью и емкостного или индуктивного накопителя энергии на стороне постоянного тока. Такие преобразователи в отечественной литературе называют еще активными выпрямителями или обращенными инверторами с ШИМ. Достаточно полная характеристика таких устройств содержится в [9].

САФ может подключаться параллельно или последовательно с нелинейным потребителем (рис. 1).

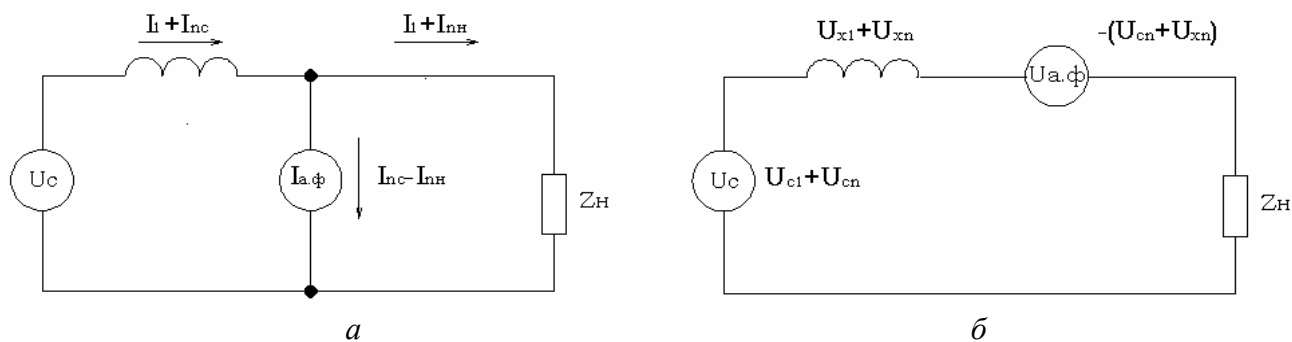


Рис. 1. Варианты подключения активного фильтра:

a – параллельный источник тока; *б* – последовательный источник напряжения

На рис. 1 обозначено: U_c – напряжение сети; I_1, I_{nc} – токи первой и *n*-ой гармоник сети соответственно; U_{c1}, U_{cn} – напряжения первой и *n*-ой гармоник

напряжения сети соответственно; U_{af} , I_{af} – напряжение и ток активного фильтра; U_{x1} , U_{xn} – падение напряжения первой и n -й гармоник на индуктивном внутреннем сопротивлении сети; I_{nn} – ток n -й гармоники нелинейной нагрузки с сопротивлением Z_n .

Для исключения или минимизации реактивной мощности всех гармоник тока, включая основную, такой преобразователь работает в режиме генератора «антигармоник». Таким образом происходит защита сети от негативного влияния высших гармоник, а также достигается повышение коэффициента мощности на основной гармонике за счет исключения фазового сдвига этой гармоники относительно сетевого напряжения. Последняя функция соответствует традиционным компенсаторам или регуляторам реактивной мощности на основной гармонике. При включении АФ по рис. 1, б или параллельно с традиционным выпрямителем с односторонней проводимостью через АФ при необходимости может осуществляться и регулирование потока амплитуды и направления не только реактивной, но и активной мощности, что существенно улучшает энергетику электропривода, работающего с частыми торможениями. Функционально-алгоритмические особенности и целесообразные границы применимости такого использования АФ рассмотрены в [10]. Схема включения АФ по рис.1, а при наличии на накопительном конденсаторе выпрямленного напряжения достаточного уровня при необходимости может быть использована и для получения дополнительных функций: стабилизации напряжения в узле нагрузки и обеспечения бесперебойного питания потребителя при кратковременных глубоких провалах сетевого напряжения. При выполнении емкостного фильтра постоянного тока АФ по принципу емкостного накопителя с использованием ионисторов [11] допустимая длительность отсутствия сетевого напряжения составляет несколько периодов.

Основным недостатком АФ является относительно большая установленная мощность входящих в них преобразователей. Практически она должна быть рассчитана на мощность, близкую или несколько превышающую мощность генератора гармоник нелинейного потребителя. Большая мощность влечет за собой использование дорогостоящих мощных ключей (GTO или IGBT).

В этом отношении перспективны гибридные фильтры (ГФ). Последние являются компромиссным техническим решением, сочетающим достоинства традиционных пассивных фильтров из реактивных элементов и АФ сравнительно малой мощности. Известно, что реальный спектр высших гармоник тока или напряжения в сети имеет стохастический и изменяющийся характер. Кроме того, на параметры фильтров влияют технологические допуски и процессы старения их элементов. В результате практически исключается строгая их настройка на фиксированные частоты. С другой стороны, точность настройки и высокая добротность фильтров, как правило, оказывают негативное влияние на переходные процессы, вызывая, например, перенапряжения в сети. Кроме того, изменение параметров сети и частотного спектра могут привести к возникновению явления «антирезонанса» (рис. 2) на частотах, близких к резонансным [9]. Для управления параметрами фильтра к его пассивным элементам подключают активные (рис. 3).

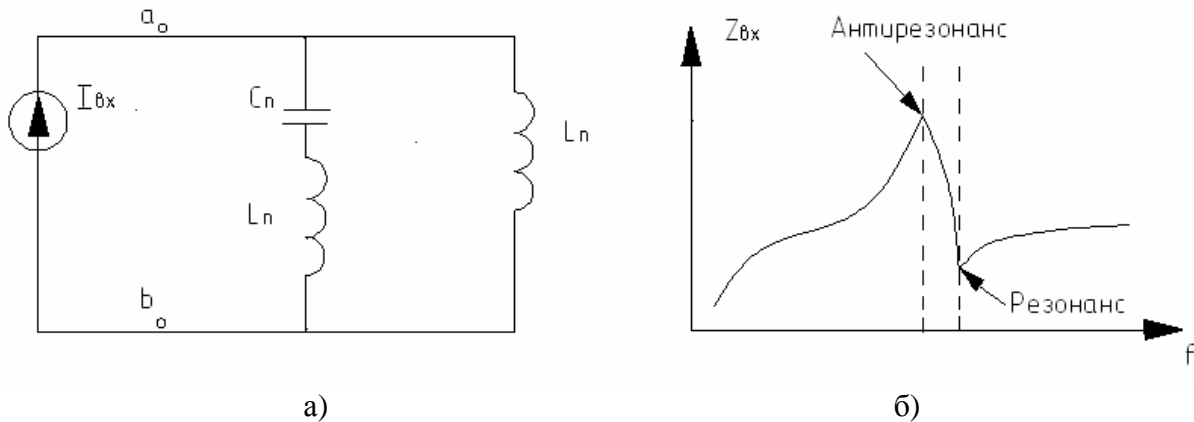


Рис. 2. Явления антирезонанса: *a* – принципиальная схема; *б* – частотная зависимость входного полного сопротивления

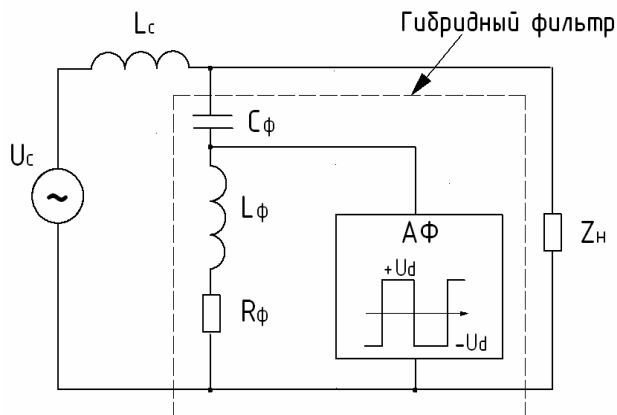


Рис. 3. Схема подключения гибридного фильтра

Мощность активного элемента в составе ГФ значительно меньше мощности АФ, выполняющего аналогичные функции, при этом качество фильтрации у ГФ гораздо выше, чем у простого пассивного. В зависимости от того, в каком режиме работает активный элемент, его полное входное сопротивление имеет индуктивный или емкостный характер, а значение активного сопротивления будет положительным или отрицательным в зависимости от направления потока активной мощности от сети в преобразователь и наоборот. При этом, изменяя закон модуляции, можно регулировать модуль и фазу тока основной гармоники активного элемента, что будет соответствовать изменению его полного входного сопротивления.

Таким образом, пассивная часть фильтра в совокупности с активным элементом становится управляемой. Это позволяет корректировать эквивалентные значения параметров ГФ для достижения наибольшего эффекта фильтрации высших гармоник. Например, в [9] сообщается, что при коэффициенте искажения тока нагрузки 35,9% применение двух пассивных LC -цепей и широкополосного RLC -фильтра снижает этот коэффициент до 28%, а при добавлении двух маломощных корректирующих преобразователей искажения тока составляет 3,9%.

Очевидно, что управление полным сопротивлением активного элемента позволяет не только корректировать отклонение параметров L_ϕ , C_ϕ и R_ϕ пассивного фильтра в составе ФКУ или компенсировать активную составляющую, но и производить их подстройку при отклонении частоты. Другим преимуществом ГФ является исключение нежелательных резонансных явлений в питающей

линии. Наличие активного элемента с управляемым полным сопротивлением в ГФ позволяет значительно снизить амплитуды токов и напряжений в системе в случае возникновения резонанса токов на частоте одной из высших гармоник. Это достигается путем создания такого полного внутреннего сопротивления активного элемента, при котором происходит не рост высшей гармоники, а ее подавление. Кроме того, ГФ, как и ФКУ выполняет функцию компенсатора реактивной мощности (батареи конденсаторов) на частоте основной гармоники.

Относительно малая мощность активного элемента делает ГФ привлекательными для использования в системе автономного электроснабжения, а также в системах с изменяющимися во времени реактивными сопротивлениями. Таким примером может служить система электроснабжения электропоезда [10]. В зависимости от местонахождения последнего эквивалентное сопротивление линии различно. АФ в этом случае позволяет адаптировать параметры ФКУ электропоезда к изменяющейся ситуации.

Современные методы активной фильтрации и компенсации неактивной мощности могут быть успешно использованы для решения других задач, связанных с обеспечением качества электроэнергии, например, стабилизации напряжения и др. Так, в [12] сообщается о создании на основе АФ многофункционального «кондиционера сети», способного выполнять уже целый комплекс задач, в который входят: стабилизация выходного напряжения кондиционера при всех видах возмущений, включая исчезновение сети, стабилизация или адаптированное регулирование коэффициента сдвига ($\cos \varphi$), фильтрация высших гармоник тока нагрузки и гармоник напряжения сетевого напряжения, подавление динамических отклонений сетевого напряжения. Негативное влияние на сеть переменного тока мощных тиристорных выпрямителей стимулировало в свое время разработку схмотехнических средств для ослабления этого влияния. Такими средствами, в первую очередь, стали: выпрямители с поочередным и несимметричным управлением, выпрямители по эквивалентным многофазным схемам управления, выпрямители с трансформаторно-ключевым ступенчатым регулированием, выпрямители на двухоперационных тиристорах, выпрямители с промежуточным регулируемым звеном высокой частоты. Появление на рынке преобразовательной техники САК на основе АФ заставляет по-новому взглянуть на целесообразность и разумные границы применения прежних традиционных и новых, с использованием САК – структур преобразовательной части электротехнических комплексов.

Расширение масштабов внедрения в последнее десятилетие двухзвенных преобразовательных установок, содержащих входным звеном неуправляемый (диодный) выпрямитель несколько изменяет в решениях обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) с сетью таких устройств. Какими бы малыми не были нелинейные искажения питающего напряжения, созданные работой преобразователей с входными диодными выпрямителями, массовое применение подобных устройств неизбежно приведет к значительному росту указанных искажений. При этом характерно, что при использовании нового поколения преобразовательных устройств и систем нелинейные искажения в сетевом напряжении суммируются арифметических ввиду того, что угол управления каждого

из таких устройств равен нулю. В системах же электроприводов с однооперационными тиристорами, использующих фазовое управление с целью регулирования выходного напряжения, нелинейные искажения формируются как геометрическая сумма составляющих. Результатом этого при использовании традиционных тиристорных является взаимная компенсация отдельных гармонических. Отсюда следует очевидный вывод: негативным последствием применения преобразовательных систем на запираемых приборах является арифметическое суммирование нелинейных искажений от отдельных преобразовательных устройств и как следствие – опасность искажения напряжения до недопустимых норм в условиях широкого применения такой высокоэффективной техники. Положительным моментом при этом является стабильность спектра гармонических составляющих.

Рассмотренная выше многовариантность выполнения звена электротехнического комплекса (электромеханической системы), обеспечивающего ЭМС комплекса с сетью переменного тока, и продолжающееся ужесточение норм на допустимый уровень обратного искажающего влияния на сеть нелинейных потребителей существенно повышают актуальность исследований по применению целесообразных режимов и областей применения различных видов САК.

Основные потери активной энергии для сравниваемых по (1) вариантов электропривода будут определяться потерями в двигателе, преобразовательном звене и в САК. Если сравниваемые варианты привода, отличаются степенью обеспечения границ управляемости технологического процесса, то возникает задача определения экономии потерь энергии при переходе от неуправляемого технологического процесса или управляемого энергетически неэффективными средствами к управляемому за счет использования регулируемого привода. Экономия энергии W_a за время работы T_p может быть определена по выражению

$$DW_a = \int_0^{T_p} \left[\left(\frac{R_{TA}(t) + DR_{TEX.p}(p)}{h_{TA}(p) \cdot h_{ЭД}(p)} + DR_{KV}(p) \right) - \left(\frac{R_{TA}(t)}{h_{np}(p) \cdot h_{TA}(p) \cdot h_{ЭД}(p)} + DR_{CAK}(p) \right) \right] dt, \quad (2)$$

где $R_{TA}(t)$ – полезная (выходная) мощность технологического агрегата, обусловленная требованиями технологии; $DR_{TEX.p}(p)$ – потери мощности на технологическое регулирование (не электрическими средствами); $DR_{KV}(p)$ – потери в компенсирующем устройстве нерегулируемого привода; $h_{TA}(p) \cdot h_{ЭД}(p)$ – КПД технологического агрегата и электродвигателя соответственно; $h_{np}(p)$ – КПД преобразовательной части привода; $DR_{CAK}(p)$ – потери в САК.

Примером потерь мощности на технологическое регулирование являются потери на создание перепада давления на задвижке (заслонке) при дроссельном регулировании насосов, вентиляторов, дымососов.

Для случаев мощных преобразователей, как правило, с радиальной схемой электропитания, при расчете достигаемой экономии активной электроэнергии, а затем и экономии платы за пользование электроэнергией необходимо до-

полнительно учитывать потери, возникающие в электроснабжающей линии. Структура платы за электроэнергию в таких случаях охарактеризована в [13].

Исходя из подхода к проблеме энергоресурсосбережения как общей, включающей в себя вопросы минимизации влияния на энергоснабжающие сети, окружающую среду и персонал в [5] применительно к использованию электро-механических систем, предложена интерпретация структуры взаимосвязей энергетической, электромеханической и биологической систем (рис.4).

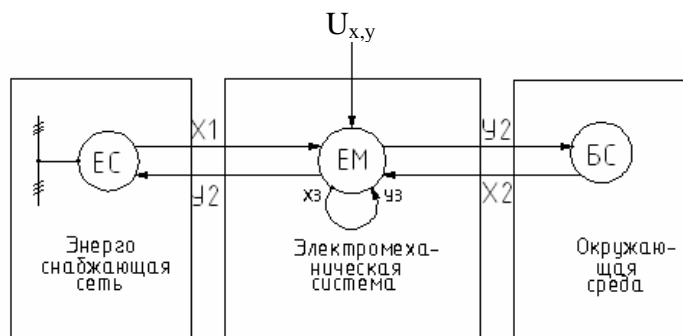


Рис. 4. Структура взаимосвязей энергетической (ЭС), электромеханической (ЭМ) и биологической (БС) систем

Управление электромеханической системой осуществляется с помощью воздействий $U_{x,y}$. Они должны быть сформированы таким образом, чтобы была достигнута технологическая цель, возлагаемая на электромеханическую систему с соблюдением имеющихся или формирующихся ограничений со стороны окружающей среды (энергетической системы) и среды обитания (биологической системы). Упомянутые ограничения или ограничительные требования формируются в процессе развития производства, техники и технологий и, как правило, однозначно приобретают законодательную базу только при наличии возможностей для реализации таких показателей. Связь электромеханической системы со средой обитания изучена недостаточно. Обычно учитываются вопросы, связанные с выделением тепла при работе преобразователей энергии, генерацией радиопомех и т.п.

Недостаточно изученными являются вопросы влияния вибраций и шума на обслуживающий персонал. Повышение степени научной оценки упомянутых факторов несомненно приведет к появлению ограничений и методов воздействия на потребителей для соблюдения устанавливаемых ограничений и еще больше повысит результативность решения оптимизационных задач в сфере энергосбережения.

Выводы 1. Выбор показателей эффективности электроприводов переменного тока определяется особенностями процессов преобразования электроэнергии в звеньях электропривода, применяемыми способами и средствами компенсации неактивных составляющих полной мощности и режимами электропитания.

2. Применение обобщенного показателя эффективности электромеханических систем – приведенных затрат – для случая современных регулируемых приводов переменного тока с использованием различных средств обеспечения электромагнитной совместимости с сетью должно базироваться на уточнении

содержания ряда энергоэкономических составляющих обобщенного показателя их эффективности.

Список литературы

1. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: Практ. Пособие: в 5 кн. / Под ред. В.А. Веникова. Кн. 2 энергосбережение в электроприводе/ Н.Ф. Ильинский, Ю.В. Рожановский, А.О. Горнов. – М.: Высш. шк. 1989. – 127с.
2. Браславский И.Я. О снижении энергопотребления асинхронных электроприводов с тиристорными преобразователями напряжения// *Электротехника*. 1988. – № 11. – С. 58–60.
3. Синчук О.Н., Алпатов А.В. О критериях оценки оптимальности работы электроприводов, выполненных по системе ТПН–АД // *Вісн. Кременчуцьк. держ. політехн. ун-ту: Зб. наук. праць КДПУ* – 2003. – Вип. 2/2003(19). – С. 56–59.
4. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Энергосбереження засобами промислового електропривода: Навч. посібник. – К.: Кондор, 2005. –408 с.
5. Родькин Д.И., Черный А.П., Мартыненко В.А. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах// *Вісн. Кременчуцьк. держ. політехн. ун-ту: Зб. наук. праць КДПУ* – 2002. – Вип. 1. – С. 81–85.
6. Александров Н.А., Краснов В.Е., Роговой В.И. Асинхронные двигатели частотно-регулируемых приводов. Автоматизированный электропривод, силовые полупроводниковые приборы, преобразовательная техника. /Под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, И.А. Тепмана, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 231–240.
7. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий – М.: Энергоатомиздат, 2000 –331 с.
8. Черный А.П., Калинов А.П., Мамчур Д.Г. Применение показателей качества преобразования энергии для оценки состояния и надежности электромеханических систем// *Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Сб. науч. Тр. Днепродзержинск. гос. техн. ун-та (технические науки)*. – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2008. – С. 519-523.
9. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Квасюк А.А. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники// *Электротехника* – 1999. – № 4. – С. 36-38.
10. Колб А.А. Система автоматического регулирования качества электроэнергии на основе полностью управляемых инверторов с релейно–векторным управлением // *Вісн. Кременчуцьк. держ. політехн. ун-ту: Зб. наук. праць КДПУ* – 2004. – Вип. 2/2004 (25). – С. 37-41.
11. Родькин Д.И., Корнет В.Н. К теории электропривода с емкостным накопителем // *Проблемы создания новых машин и технологий.: Научные труды Кременчугского государственного политехнического университета*. – Кременчуг: КГПУ, 2000. – Вып. 2/200(9) – С. 149-151.
12. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Квасют А.А. и др. Силовая электроника и качество электроэнергии // *Электротехника* – 2002. – № 2. – С. 16–23.
13. Луговой А.В., Родькин Д.И., Черный А.П. и др. Энергосберегающее оборудование для систем нерегулируемого электропривода // *Проблемы создания новых машин и технологий: Научные труды Кременчугского государственного политехнического института*. –Кременчуг: КГПУ, 2000. – Вып.1. – С. 15-23.