

УДК 621.314.333

МЕТОДИКИ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ЭНЕРГОПОДСИСТЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ВЫСОКИМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

П.А. Борисов, В.С. Томасов

Рассматриваются методики анализа и синтеза энергетических подсистем электротехнических комплексов с высокими энергетическими показателями при одно- и двухстороннем энергопотреблении в зависимости от типа и свойств первичного источника питания, характера и режимов работы нагрузки. Поиск вариантов проекта проводится в процессе решения оптимизационной задачи, что позволяет сделать обоснованный выбор окончательного варианта проекта энергоподсистемы.

Ключевые слова: активный выпрямитель напряжения, звено постоянного тока, неуправляемый выпрямитель, рекуперация, спектральный метод, широтно-импульсный преобразователь, электропривод постоянного тока, энергетическая подсистема, энергетические показатели.

Введение

Широкое использование в современных электротехнических комплексах различного назначения регулируемых систем с полупроводниковыми преобразователями электрической энергии требует дальнейшего совершенствования их энергетических подсистем (ЭП). ЭП включает в себя силовые цепи первичного источника питания, полупроводникового преобразователя, нагрузки и определяет массогабаритные и динамические показатели электротехнических комплексов и систем.

Полупроводниковый преобразователь является неотъемлемой частью современных систем электропитания технологических объектов, а также систем автоматизированного электропривода, обеспечивая их электрической энергией требуемого вида и качества. Постоянное совершенствование элементной базы полупроводниковых преобразователей за счет создания и освоения промышленностью высокоэффективных силовых приборов и вычислительных устройств на базе программируемых микроконтроллеров позволило существенно расширить функции силовых устройств и активно влиять на показатели качества потребляемой ЭП электроэнергии и их электромагнитную совместимость с питающей сетью средствами самой преобразовательной техники. Решение задач обеспечения необходимых энергетических показателей и минимизации массогабаритных показателей ЭП сводится к определению полной мощности ЭП и ее составляющих.

Методикам расчета и проектирования ЭП различного типа уделено достаточно внимания в литературе, изданной в 1980–90 г.г. Однако в связи с тем, что за последнее десятилетие ужесточились требования международных и отечественных стандартов к качеству энергопотребления ЭП, возникла необходимость пересмотра и доработки существующих методик расчета и проектирования. Задачи совершенствования энергетических показателей ЭП напрямую связаны с вопросами определения составляющих полной мощности. В теории мощности в цепях с несовпадающими формами напряжения и тока выделяются два направления: спектральное (рядов Фурье) и интегральное. Определение составляющих полной мощности на основе разложения на гармоники является сложной и трудоемкой операцией [1], поэтому спектральный метод не получал широкого применения. Однако в настоящее время перспективность его использования обусловлена тем, что требования международных стандартов IEC 61000-3, EN 61000-3-2,

IEEE 519 жестко регламентируют уровень гармонических составляющих тока, потребляемого электротехническим устройством, вплоть до 49-й гармоники. Отечественный ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95) ограничивается гармониками до 40-й.

При проектировании систем с полупроводниковыми преобразователями необходимо не только правильно учитывать и разделять все составляющие полной или кажущейся мощности, но и закладывать мероприятия по уменьшению мощностей обменного характера. Совершенствование энергетических показателей ЭП достигается за счет снижения вклада в полную мощность ее неактивных составляющих, что позволяет уменьшить загрузку оборудования, его установленные мощности и, в конечном счете, улучшить массогабаритные показатели ЭП.

Решение вопроса об оптимальном выборе структуры и параметров элементов ЭП должно производиться в зависимости от требований, предъявляемых к электротехническому комплексу в целом с учетом типа источника питания, характера и режимов работы нагрузки. Требования, предъявляемые к современным ЭП, заставляют сочетать такие их качества, как повышенная эффективность преобразования электрической энергии и надежность функционирования. Отвечать этим требованиям невозможно без учета переходных процессов в ЭП и определения электромагнитных нагрузок, воздействующих на элементы ЭП при включении ее в питающую сеть.

В данной статье рассматриваются структуры ЭП, построенных на базе источников питания переменного тока с последующим преобразованием в постоянный с односторонним потреблением и двухсторонним обменом энергией между питающей сетью и нагрузкой с против-э.д.с. При построении ЭП с двухсторонним обменом энергией между питающей сетью и нагрузкой наиболее важными являются вопросы определения структуры и параметров ЭП, обеспечивающих эффективный способ использования энергии рекуперации. Реализация в замкнутых системах электропривода эффективных тормозных режимов накладывает жесткие требования к выбору состава оборудования ЭП и определению электромагнитных нагрузок на ее элементах. Рассмотрены ЭП замкнутых систем электропривода постоянного тока (ЗС ЭППТ) с транзисторными широтно-импульсными преобразователями (ШИП), которые находят широкое применение в промышленном и научном приборостроении и других отраслях. Приведенная в статье методика позволяет выбирать наиболее эффективный способ использования энергии рекуперации и правильно определять структуру звена постоянного тока (ЗПТ) ЗС ЭППТ.

Методика анализа энергоподсистем с односторонним энергопотреблением

ЭП, построенная на базе источника питания переменного тока с последующим преобразованием в постоянный, включает в себя выпрямитель с силовым фильтром (СФ). В ЭП с односторонним энергопотреблением схема выпрямления, схема СФ и его параметры определяются исходя из требования сглаживания пульсаций выходного напряжения выпрямителя. На практике широкое применение находят ЭП на базе выпрямителей с емкостными (С) и Г-образными индуктивно-емкостными фильтрами (LC). Для структурно-параметрического анализа таких ЭП используется методика, основанная на операторном методе совместно с методом гармонического анализа. Полная система выражений для анализа электромагнитных и энергетических процессов в ЭП на базе выпрямителей с С- и LC-фильтрами приведена в [2]. Расчет производится по спектральному составу сетевого тока с использованием преобразований Фурье и Эйлера и позволяет определить полную мощность S и ее составляющие – активную P , реактивную Q (сдвига), искажения T , несимметрии H , коэффициент полезного действия (к.п.д.) ЭП и энергетические коэффициенты – $K_{\text{мощности}} = P/S$, $K_{\text{сдвига}} = P/\sqrt{P^2 + Q^2}$, искажения синусоидальности

кривой сетевого тока, или $K_{\text{ГАРМОНИК}} = T / \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{\sum_{k=2}^N (I_{kRMS})^2} / I_{1RMS}$, и др., а также

мощность в нагрузке и все возможные значения токов и напряжений схемы. Численные расчеты производятся в пакете MathCAD, при этом спектры ограничиваются 40-й гармоникой согласно ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95). По результатам расчетов в [2] получены диаграммы зависимостей электромагнитных нагрузок, установленных мощностей и энергетических показателей от основных параметров схем ЭП.

В ходе анализа ЭП с С-фильтрами отмечено, что они имеют низкие энергетические показатели, связанные с характерной особенностью – наличием «отсечки» тока, потребляемого из сети. При малых значениях коэффициента пульсаций по 1-й гармонике $K_{П1}$ напряжения на нагрузке в ЭП с С-фильтром основной вклад в полную мощность вносится мощностью искажения T . Для улучшения энергетических показателей данных ЭП требуются методы с компенсацией мощности искажения (активная коррекция), которые отличаются от методов компенсации реактивной мощности.

Наилучшие энергетические показатели в ЭП с Г-образными LC-фильтрами достигаются при форме сетевого тока, близкой к прямоугольной. Требуемая форма тока в однофазной ЭП с Г-образным LC-фильтром может быть обеспечена при выполнении условия [2]

$$L_{\Phi} \geq 3R_{\text{Н}}/\omega_{\text{и}}, \quad (1)$$

где $\omega_{\text{и}} = 2\pi f_{\text{и}}$ – угловая частота напряжения питающей сети, $f_{\text{и}}$ – частота напряжения питающей сети, $R_{\text{Н}}$ – активное сопротивление нагрузки, L_{Φ} – индуктивность LC-фильтра. При выполнении условия (1) обеспечиваются следующие энергетические показатели: коэффициент мощности $\approx 0,9$, коэффициент искажения синусоидальности кривой сетевого тока $\approx 0,48$. Для трехфазной ЭП с Г-образным LC-фильтром получено условие [2]

$$L_{\Phi} \geq 0,1R_{\text{Н}}/\omega_{\text{и}}, \quad (2)$$

при выполнении которого коэффициент мощности $\approx 0,95$, коэффициент искажения синусоидальности кривой сетевого тока $\approx 0,32$. Однако даже наилучшие энергетические показатели указанных ЭП не отвечают в большинстве случаев требованиям стандартов, что заставляет разработчиков отказываться от простых выпрямительных схем на входе полупроводниковых преобразователей различных типов, а также регулируемых электроприводов на базе управляемых выпрямителей.

Явления искажения обязаны своим происхождением элементам электрической цепи, имеющим несинусоидальную форму напряжения, и компенсировать их можно, внося искажающие воздействия в форму кривых напряжений и токов преобразовательного устройства. Использование пассивных Г- и Т-образных силовых фильтров одновременно на стороне переменного и постоянного токов позволяет деформировать форму выпрямляемого напряжения, влияя таким образом на спектральный состав потребляемого электро-техническим устройством тока и саму мощность искажения, и обеспечить улучшение энергетических показателей ЭП [2]. Однако такие методы обладают рядом существенных недостатков. С точки зрения возможностей формирования входных и выходных токов и напряжений с требуемыми показателями качества более перспективно и эффективно применение схем ЭП с активной коррекцией энергетических показателей.

Методики анализа и синтеза энергоподсистем с двухсторонним энергопотреблением

Преобразователи, обеспечивающие двухстороннее энергопотребление, т.е. возможность работы в четырех квадрантах комплексной плоскости на стороне переменного тока, носят в отечественной литературе [3] название активных преобразователей (АП). В англоязычной литературе используется обобщенный термин – преобразователь

переменного/постоянного тока, соответствующий терминологии стандарта МЭК 60050-551 (AC/DC Converter). Управляемые силовые модули, на базе которых строится преобразователь, могут иметь разное исполнение, обеспечивая полную управляемость им в режиме потребления нагрузкой энергии и (или) рекуперации энергии в сеть.

Активный выпрямитель напряжения (АВН) представляет собой автономный инвертор напряжения, выполненный на силовых ключах с обратными диодами и обращенный на сторону переменного тока. В режиме рекуперации энергия возвращается в сеть через инвертор рекуперации (ИР). Неуправляемый выпрямитель (НУВ) структурно входит в состав АВН, и выпрямление осуществляется через обратные диоды. Для обмена реактивной мощностью, включающей мощность высших гармоник, между сетью переменного тока и АВН используется конденсатор СФ ЗПТ. В принципе работы АВН заложен импульсный повышающий напряжение регулятор, поэтому он обязательно содержит в своем составе токоограничивающий дроссель, устанавливаемый на стороне переменного тока.

Расчет и проектирование ЭП на базе АВН должны осуществляться с учетом электромагнитных нагрузок, воздействующих на элементы ЭП при включении в питающую сеть. Эффект повышения в таких схемах достигается за счет кратковременного (относительно периода питающей сети) закорачивания цепи источника через токоограничивающий дроссель, накопления за это время энергии в дросселе и ее последующей отдачи в конденсатор СФ. В принцип работы схем повышающего типа не заложена возможность длительного (в течение периода питающей сети) отключения цепи нагрузки от цепи источника питания. При пуске ток заряда конденсатора СФ протекает через НУВ, структурно входящий в схему АВН, в результате при пуске наблюдаются такие же процессы, как в традиционных выпрямителях [2].

В качестве систем с двухсторонним энергопотреблением чаще всего выступают электроприводы постоянного или переменного токов. Наиболее массовое практическое применение в регулируемых электроприводах получили двухзвенные преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока. В современных системах электропривода постоянного тока энергетическая подсистема, если нет необходимости в автономном источнике питания, включает в себя силовые цепи сети переменного тока, НУВ или АВН, СФ, тормозную цепь (ТЦ), силовой каскад транзисторного ШИП, ДПТ.

Различные условия работы производственных механизмов обуславливают различные режимы работы электроприводов. Предельные динамические возможности электропривода определяются параметрами энергетической подсистемы, так как информационная подсистема не может обеспечить требуемые моменты, скорости и ускорения двигателя, если они не заложены в ЭП. Для ЭП ЗС ЭППТ решающими факторами при выборе их структуры и расчете параметров элементов являются обеспечение надежной коммутации силовых ключей ШИП и прием энергии рекуперации вращающихся частей электропривода [4].

При торможении электропривода кинетическая энергия, которой обладают вращающиеся массы привода в начальный момент торможения, превращается в электрическую энергию и возвращается в звено постоянного тока. Избыточную энергию необходимо аккумулировать или преобразовывать в другую форму. Принципиально существует три возможности:

- 1) аккумулирование (запас) энергии в конденсаторе силового фильтра;
- 2) использование ТЦ, состоящей из прерывателя и тормозного сопротивления (преобразование энергии в тепло);
- 3) рекуперация (возврат) энергии в сеть посредством ИР (использование электрической энергии другим пользователем).

Величины рекуперированной энергии в емкость СФ и электромагнитных нагрузок на элементы ЭП, а также их зависимости от параметров системы электропривода и ре-

жима ее работы определяются по методике, использующей диаграмму нагрузки электропривода [4]. Наиболее тяжелым режимом работы ЗС ЭППТ с ШИП, при котором электромагнитные нагрузки максимальны, является режим периодического реверса скорости с выходом в зону ограничения тока якоря на заданном уровне \bar{I}_0 . Для данного режима работы кинетическая энергия вращающихся частей электропривода на интервале рекуперации определяется, согласно [2], как

$$\bar{W}_{\text{РЕК}} = (\bar{\Omega}_y^2 - \bar{I}_0^2), \quad (3)$$

где $W_{\text{max}} = J_{\Sigma} \Omega_{\text{XX}}^2 / 2$, $U_{\text{Б}} = c_{\text{Е}}' \Omega_{\text{XX}}$, $I_{\text{КЗ}} = U_{\text{Б}} / r_{\text{Я}}$, Ω_y – величина скорости в установившемся режиме, J_{Σ} – приведенный момент инерции двигателя с нагрузкой, $r_{\text{Я}}$ – сопротивление обмотки якоря, $c_{\text{Е}}'$ – конструктивный коэффициент. С учетом того, что эта энергия за время рекуперации рассеивается в якорной цепи машины и заряжает емкость СФ, т.е. является суммой двух составляющих, получим формулу для определения величины энергии, запасаемой в емкости СФ [2]:

$$\bar{W}_{\text{С}} = \bar{I}_0 (\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0)^2 / (\bar{I}_0 + \bar{I}_{\text{СТ}}), \quad (4)$$

где $\bar{I}_{\text{СТ}}$ – ток, обусловленный статическим моментом нагрузки. Энергия, потребляемая из звена постоянного тока за времена интервалов разгона t_p , движения с установившейся скоростью t_y и торможения t_T , т.е. за время $T_{\text{П}} = t_T + t_p + t_y$ [2], равна

$$\bar{W}_{\text{П}} = \frac{\frac{\bar{I}_0^3}{\bar{I}_0 + \bar{I}_{\text{СТ}}} + \frac{\bar{I}_0 \bar{\Omega}_y (\bar{\Omega}_y + 2\bar{I}_0)}{(\bar{I}_0 - \bar{I}_{\text{СТ}})} + 2\bar{I}_{\text{СТ}} \left(\frac{T_{\text{П}}}{T_{\text{М}}} - \frac{2\bar{\Omega}_y \bar{I}_0}{(\bar{I}_0^2 - \bar{I}_{\text{СТ}}^2)} \right) (\bar{\Omega}_y + \bar{I}_{\text{СТ}})}{\eta_{\Sigma}}, \quad (5)$$

где $\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{ДПТ}} \cdot \eta_{\text{ШИП}}$, $\eta_{\text{ДПТ}}$ – к.п.д. ДПТ, $\eta_{\text{ШИП}}$ – к.п.д. ШИП, $T_{\text{М}}$ – электромеханическая постоянная времени. Полученные зависимости (4) и (5) позволяют соотнести энергию $\bar{W}_{\text{С}}$ с потребляемой из сети электрической энергией $\bar{W}_{\text{П}}$ за время $T_{\text{П}}$ при заданных параметрах нагрузки и режима работы и дают возможность сравнивать эффективность различных способов использования энергии рекуперации при заданных требованиях к энергетическим, массогабаритным и эксплуатационным характеристикам системы электропривода в целом.

Исходя из электромеханических (низкочастотных) процессов в ЭП ЗС ЭППТ, когда ТЦ и АВН не используются, напряжение на конденсаторе СФ в конце интервала рекуперации определяется [2] как

$$\bar{U}_{\text{Сmax}} = \sqrt{\bar{W}_{\text{С}} (T_{\text{М}} / r_{\text{Я}} C_{\text{Ф}}) + \bar{U}_{\text{С0y}}^2}, \quad (6)$$

где величина напряжения на конденсаторе СФ в начале интервала рекуперации $\bar{U}_{\text{С0y}}$, т.е. на интервале движения с установившейся скоростью, определяется по формуле [2]

$$\bar{U}_{\text{С0y}} = \sqrt{1 - (2\bar{I}_{\text{СТ}} / r_{\text{Я}} C_{\text{Ф}} p f_{\text{И}})}. \quad (7)$$

На основании выражений (6) и (7) можно установить соотношение для определения емкости конденсатора СФ из условия ограничения напряжения на нем на заданном уровне $\bar{U}_{\text{Сmax зад}}$ в режиме рекуперации [2]:

$$C_{\text{Ф1}} = [\bar{W}_{\text{С}} T_{\text{М}} - (2\bar{I}_{\text{СТ}} / p f_{\text{И}})] / [r_{\text{Я}} (\bar{U}_{\text{Сmax зад}}^2 - 1)]. \quad (8)$$

Из условия минимально допустимого снижения напряжения на конденсаторе СФ $\bar{U}_{\text{Сmin}}$ на интервале разгона при заданном уровне токоограничения \bar{I}_0 емкость СФ выбирается [2] как

$$C_{\text{Ф2}} = 2\bar{I}_0 / [r_{\text{Я}} (1 - \bar{U}_{\text{Сmin}}^2) p f_{\text{И}}]. \quad (9)$$

На основании соотношений (4)–(9) формулируется методика выбора параметров дискретно функционирующей тормозной цепи ЗПТ в ЗС ЭППТ с ШИП. Применение ТЦ целесообразно при $C_{\Phi 1} > C_{\Phi 2}$, что позволяет снизить величину емкости конденсатора СФ до значения $C_{\Phi 2}$ и его установленную мощность. Выбор параметров ТЦ производится из условия ограничения напряжения на конденсаторе СФ на заданном уровне $\bar{U}_{C \max \text{ зад}}$ в режиме рекуперации. Время включения тормозной цепи t_0 определяется из равенства [2]:

$$(\bar{U}_{C \max \text{ зад}}^2 - \bar{U}_{C 0 y}^2) r_{\text{я}} C_{\Phi 2} / T_{\text{М}} = \bar{W}_{\text{С}}(t_0), \quad (10)$$

при величине емкости СФ, равной $C_{\Phi 2}$, где

$$\bar{W}_{\text{С}}(t_0) = \bar{I}_0 t_0 [2(\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0) - (\bar{I}_0 + \bar{I}_{\text{СТ}})(t_0 / T_{\text{М}})] / T_{\text{М}}. \quad (11)$$

Выражение (11) определяет энергию, аккумулируемую в конденсаторе СФ, за время от начала рекуперации до момента достижения напряжения на емкости СФ заданного уровня $\bar{U}_{C \max \text{ зад}}$. Энергия и рассеиваемая мощность в ТЦ [2]:

$$\bar{W}_{\text{ТЦ}} = r_{\text{я}} C_{\Phi 2} (\bar{U}_{C \max}^2 - \bar{U}_{C \max \text{ зад}}^2) / T_{\text{М}}, \quad (12)$$

$$P_{\text{ТЦ}} = \bar{W}_{\text{ТЦ}} / (t_{\text{РЕК}} - t_0), \quad (13)$$

где

$$t_{\text{РЕК}} = T_{\text{М}} (\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0) / (\bar{I}_0 + \bar{I}_{\text{СТ}}). \quad (14)$$

Сопротивление тормозного резистора выбирается согласно [2]:

$$R_{\text{ТЦ}} = U_{C \max \text{ зад}}^2 / P_{\text{ТЦ}}. \quad (15)$$

При этом действующее значение тока в ТЦ определяется [2] как

$$I_{\text{ТЦ rms}} = \sqrt{P_{\text{ТЦ}} / R_{\text{ТЦ}}}. \quad (16)$$

Таким образом, разработанная методика и найденные зависимости позволяют решать вопросы параметрической оптимизации ЭП электротехнических комплексов и систем приборного электропривода с высокими энергетическими показателями. В ходе решения задачи оптимизации необходимо определить множество параметров элементов ЭП, обеспечивающих экстремальность каких-либо целей при заданных ограничениях на множество внутренних переменных. Поэтому эту задачу называют задачей параметрической оптимизации, и ее разрешимость определяется размерностью оптимизируемой системы [5, 6].

Разработанная методика, по существу, применима для решения задач анализа ЭП, т.е. позволяет сформулировать свойства ЭП по результатам решения. Для непосредственного ее использования в целях синтеза ЭП в проектировании поиск вариантов должен проводиться в ходе решения оптимизационной задачи, что позволяет сделать обоснованный выбор окончательного варианта проекта ЭП. Разработанная методика позволяет получить требуемую аналитическую модель ЭП и составить целевую функцию.

Поставленная и решаемая задача поиска оптимального проекта относится к классу задач нелинейного программирования. Задача сводится к поиску численным методом экстремума (минимума) целевой функции, зависимость которой от внутренних переменных может быть установлена аналитической моделью ЭП [5, 6]. В простейшем случае целевая функция представляет собой линейную комбинацию нормированных переменных модели с весовыми коэффициентами. В данной статье не рассматриваются вопросы, касающиеся выбора метода или оптимизационного алгоритма, исследования его сходимости. Решение оптимизационной задачи осуществляется приведенными в литературе [5, 6] алгоритмами и методами, конкретно – методом деформируемого многогранника [6]. Программы оптимизации также приводятся в литературе [6] и взяты за базу для решения оптимизационной задачи [7].

Приведенная методика структурно-параметрического синтеза ЭП ЗС электропривода при двухстороннем энергообмене между источником и нагрузкой позволяет выбрать состав оборудования ЭП – силового фильтра, тормозной цепи и АВН, а также определить электромагнитные нагрузки на их элементы в зависимости от величины рекуперированной энергии вращающихся частей электропривода, уровня токоограничения и циклограммы работы ЗС электропривода.

Верификация результатов исследований

В современных интегрированных пакетах MathCAD, OrCAD/Pspice, MATLAB/Simulink реализованы модели энергоподсистем с односторонним энергопотреблением, а также модели ЗС ЭППТ с ШИП.

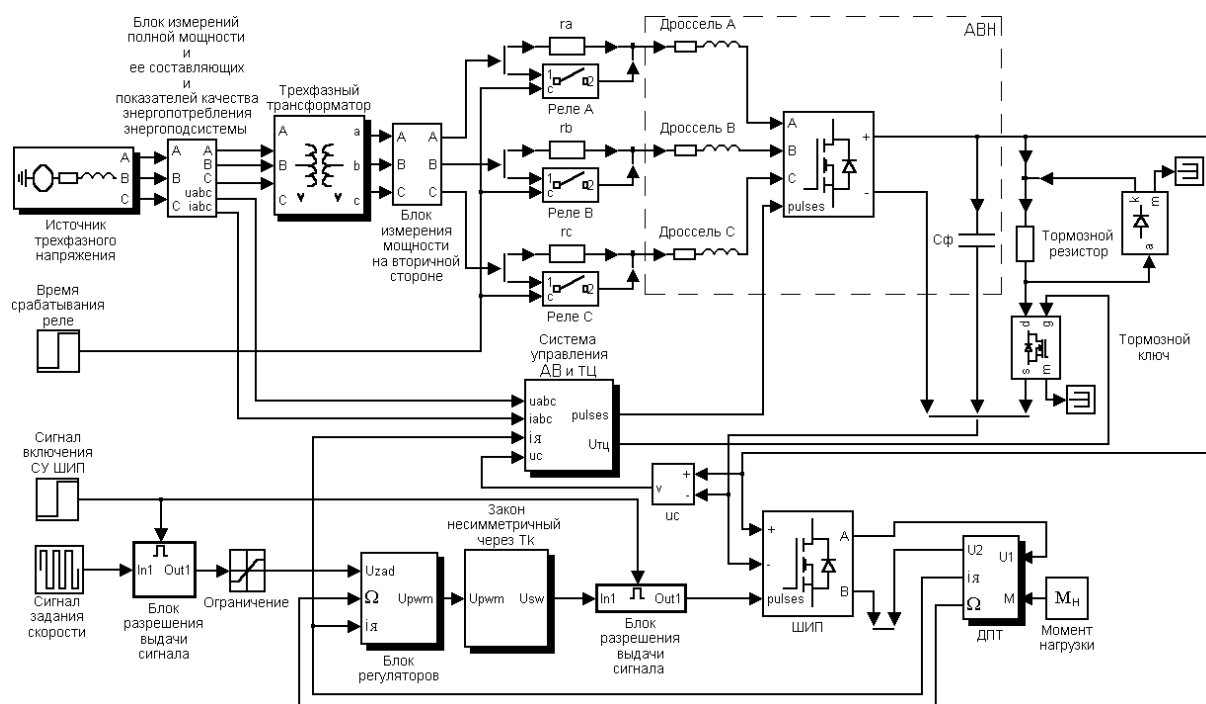


Рис. 1. Модель ЗС ЭППТ с ШИП на базе трехфазного АВН

Модель ЗС ЭППТ на базе АВН, реализованная в пакете MATLAB/Simulink [2], представлена на рис. 1. Модель включает отдельные модели элементов ЭП (источника питания, сетевого трансформатора, вентильного блока НУВ или АВН, ШИП, ДПТ), информационной подсистемы (системы управления ШИП, состоящей из блока регуляторов и формирователя сигналов управления ключами ШИП по соответствующему алгоритму, системы управления ИР и ТЦ, блока измерений полной мощности и ее составляющих и показателей качества энергопотребления ЭП [8, 9]), а также блока измерения мощности на вторичной стороне трансформатора. Система управления и регулирования АВН является двухконтурной с внешним контуром регулирования напряжения ЗПТ на базе пропорционально-интегрального регулятора и внутренним подчиненным контуром регулирования сетевых токов [2].

Установлено [2], что применение АВН в ЗС ЭППТ с ШИП позволяет снизить емкость конденсатора СФ ЗПТ и его установленную мощность, стабилизировать напряжение в ЗПТ и регулировать его с заданной динамикой, обеспечить рекуперацию энергии в сеть и тем самым повысить энергетическую эффективность системы электропривода, улучшить показатели качества энергопотребления ЭП. Однако таким системам

присущи следующие особенности и недостатки: при использовании сетевого трансформатора его габаритную мощность потребуется выбирать завышенной относительно ЭП на базе НУВ или ограничивать на заданном уровне сетевой ток, что снизит динамические качества ЗС ЭППТ; должно быть гарантировано, что энергия может быть возвращена в питающую сеть, т.е. необходимо дополнительно учитывать характер сети электроснабжения.

Экспериментальные исследования ЭП ЗС ЭППТ проводились на лабораторном комплексе «Прецизионный приборный электропривод с улучшенными энергетическими показателями и компьютерным управлением» [10] и на опытных образцах ЗС ЭППТ квантово-оптических систем различного назначения, разработанных на кафедре электротехники и прецизионных электромеханических систем (ЭТиПЭМС) СПбГУ ИТМО по госбюджетным и хоздоговорным НИР. Экспериментальные исследования ЭП с односторонним энергопотреблением и ЗС ЭППТ подтвердили справедливость полученных теоретических положений, доказали адекватность моделей.

Заключение

В статье рассматриваются методики анализа и синтеза ЭП электротехнических комплексов с высокими энергетическими показателями при одно- и двухстороннем энергопотреблении в зависимости от типа и свойств первичного источника питания, характера и режимов работы нагрузки.

Изложена методика структурно-параметрического анализа ЭП при одностороннем потреблении электроэнергии с учетом свойств первичного источника питания и начальной фазы включения в питающую сеть, позволяющая уменьшить электромагнитные нагрузки на элементы ЭП и улучшить их энергетические показатели. Методика структурно-параметрического синтеза ЭП замкнутых систем электропривода при двухстороннем энергообмене между источником и нагрузкой позволяет выбрать состав оборудования ЭП и определить электромагнитные нагрузки на их элементы в зависимости от величины рекуперлируемой энергии вращающихся частей электропривода, уровня токоограничения и циклограмм работы замкнутой системы электропривода. Предложена методика выбора структуры ЭП, расчета параметров ее элементов и электромагнитных нагрузок на них на примере ЗС ЭППТ с ШИП. Поиск вариантов проекта проводится в процессе решения оптимизационной задачи, что позволяет сделать обоснованный выбор окончательного варианта проекта ЭП. Задача сводится к поиску численным методом экстремума (минимума) целевой функции, зависимость которой от внутренних переменных устанавливается аналитической моделью ЭП.

Обоснованность и достоверность результатов исследований базируется на использовании известных положений теории энергетических процессов в вентильных преобразователях и теории электропривода, подтверждается моделированием систем в современных интегрированных пакетах MathCAD, MATLAB/Simulink, OrCAD/PSpice, сравнением с данными из литературных источников, а также достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных исследований.

Разработанные математические модели позволяют определять составляющие полной мощности, показатели качества энергопотребления ЭП [8, 9], структуру и параметры ЭП ЗС ЭППТ на базе неуправляемого выпрямителя и АВН.

Результаты работы нашли практическое применение при проектировании квантово-оптических систем нового поколения на базе рассмотренных ЗС ЭППТ на кафедре ЭТиПЭМС СПбГУ ИТМО.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке и высшей школе г. Санкт-Петербурга по гранту PD07-2.0-90 в рамках региональной программы «Развитие высшей школы г. Санкт-Петербурга» на 2007 г.

Литература

1. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок: пер. с польск. под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
2. Борисов П.А. Совершенствование энергетических показателей электротехнических комплексов и систем с полупроводниковыми преобразователями: Дисс. ... канд. техн. наук. – СПб, 2005.
3. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока: под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Р.Т. Шрейнера. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с., ил.
4. Томасов В.С., Сеницын В.А., Борисов П.А. Исследование электромагнитных процессов в энергетическом канале замкнутой системы электропривода постоянного тока // Изв. вузов. – Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 11. – С. 9–16.
5. Тонкаль В.Е. Оптимизация силовых полупроводниковых преобразователей / В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, М.Т. Стрелков. Оптимизация схем и параметров устройств преобразовательной техники. – Киев: Наук. думка, 1983. – С. 3–13.
6. Банди Б. Методы оптимизации: вводный курс. – М.: Радио и связь, 1988.
7. Борисов П.А. Оптимизация энергоподсистем электротехнических устройств на базе неуправляемых выпрямителей // Сборник трудов II конференции молодых ученых и специалистов СПб ГУ ИТМО. – 2005. – Т. 2. – С. 30–37.
8. Борисов П.А., Томасов В.С. Определение составляющих полной мощности энергоподсистем электротехнических комплексов // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – № 1. – С. 40–44.
9. Борисов П.А. Применение MATLAB/Simulink для измерения и оценки качества электроэнергии в трехфазных симметричных системах с активными преобразователями // Труды II-й Всероссийской научной конференции. Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB. – М., 2004. – С. 1372–1387.
10. Борисов П.А., Денисов К.М., Жданов И.Н., Лукичев Д.В., Сеницын В.А., Томасов В.С. Лабораторный комплекс «Прецизионный приборный электропривод с улучшенными энергетическими показателями и компьютерным управлением» // Тезисы докладов II Всероссийской научно-практической конференции «Образовательная среда сегодня и завтра». – М., 2005. – С. 47–49.

Борисов Павел Александрович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, borisov@ets.ifmo.ru
Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ведущий кафедрой, кандидат технических наук, доцент, tomasov@ets.ifmo.ru

Томасов Валентин Сергеевич