

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 621.313, 621.314.58

П. А. БОРИСОВ, Д. В. ЛУКИЧЕВ

## МЕТОДИКИ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ЭНЕРГОПОДСИСТЕМ ПРИБОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Рассматриваются методики структурно-параметрического анализа и синтеза энергетических подсистем приборных электроприводов с высокими энергетическими показателями. Предлагаемые методики позволяют в процессе решения оптимизационной задачи осуществить поиск вариантов проекта энергоподсистемы.

*Ключевые слова:* звено постоянного тока, инвертор рекуперации, приборный электропривод, широтно-импульсный преобразователь, энергетическая подсистема.

В настоящее время основные усилия по энергосбережению сконцентрированы в сфере потребления электроэнергии. Учитывая, что более 60% всей вырабатываемой электроэнергии потребляют электроприводы, высокую актуальность при их проектировании, эксплуатации и модернизации приобретают задачи энергосбережения. При построении энергетических подсистем (ЭП) современных систем электропривода с двусторонним обменом энергией между питающей сетью и электрической машиной наиболее важными являются вопросы определения структуры и параметров ЭП, обеспечивающих эффективный способ использования энергии рекуперации. Реализация в замкнутых системах (ЗС) электропривода эффективных тормозных режимов накладывает жесткие требования к выбору состава оборудования ЭП и определению электромагнитных нагрузок на ее элементы. Поэтому создание комплексных методик анализа и синтеза энергоподсистем приборных электроприводов с высокими энергетическими показателями является актуальной задачей.

В регулируемых электроприводах наиболее массовое практическое применение в настоящее время получили двухзвенные преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока (ЗПТ) [1]. Энергоподсистема современных систем приборного электропривода содержит: силовые цепи сети переменного тока, выпрямитель (диодный или на управляемых ключах), ЗПТ с силовым фильтром (СФ), тормозную цепь (ТЦ), силовой каскад широтно-импульсного преобразователя (ШИП), исполнительный двигатель (ИД).

Среди ИД приборных электроприводов наилучшими регулировочными свойствами обладают двигатели постоянного тока (ДПТ). Однако наличие щеточно-коллекторного узла создает ряд трудностей при использовании таких машин в системах с повышенными требованиями к надежности. Поэтому наряду с коллекторными двигателями находят широкое применение бесконтактные ДПТ (БДПТ), в качестве которых может быть использован любой из известных типов синхронных двигателей переменного тока [2]. Управление скоростью и на-

правлением вращения БДПТ осуществляется, как и управление коллекторными ДПТ, путем изменения значения и полярности подводимого напряжения, т.е. принцип управления остается таким же.

Основой построения ЗС электропривода в отечественной и зарубежной практике служит структура подчиненного регулирования [1, 2], содержащая ряд замкнутых контуров, последовательно охватывающих друг друга. Поэтому будем рассматривать только ЗС приборного электропривода, построенные в соответствии со структурой подчиненного регулирования, в которой электрическая цепь машины является объектом для подчиненного контура регулирования тока, а механическая часть — объектом для контуров регулирования скорости вращения и положения.

Предельные динамические возможности электропривода определяются параметрами ЭП, так как информационная подсистема не может обеспечить требуемые характеристики ИД (моменты, скорости и ускорения), если они не заложены в ЭП [2].

Для энергоподсистем ЗС электропривода решающими факторами при выборе их структуры и расчете параметров элементов являются прием энергии рекуперации вращающихся частей электропривода и обеспечение надежной коммутации силовых ключей ШИП [3, 4]. Последний фактор определяет минимальное значение емкости конденсатора СФ, который обеспечивает в моменты коммутации тока в ШИП отсутствие опасных перенапряжений на силовых ключах. Пульсации напряжения на конденсаторе СФ являются функцией ( $\gamma$ ) относительной продолжительности включения цепи ИД посредством ШИП в цепь звена постоянного тока и достигают максимума при  $\gamma = 0,5$ :

$$\Delta U_{C_{\max}} = 0,25 I_{\text{я max}} / (f_{\text{к}} C_{\text{ф}}).$$

Для режима ограничения тока, когда  $I_{\text{я max}} = I_0$ , получим

$$C_{\text{ф min}} = 0,25 I_0 / (\Delta U_{C_{\max}} f_{\text{к}}),$$

где  $f_{\text{к}}$  — частота коммутации ШИП.

В общем случае мощность, расходуемая в системе электропривода, используется для:

- преодоления нагрузки (в рассматриваемом случае статического момента);
- создания запаса кинетической энергии вращающихся масс электропривода, определяемой динамическим моментом;
- покрытия потерь в электродвигателе.

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. Для этого принципиально существует три основные возможности [1]:

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

В случае аккумулирования энергии рекуперации в конденсаторе СФ звена постоянного тока возможно построение энергоподсистемы ЗС электропривода с односторонним потреблением электроэнергии. При проектировании современных ЭП с односторонним потреблением электроэнергии, к которым предъявляются жесткие требования по значениям гармонических составляющих потребляемого из сети тока, эффективным является построение звена постоянного тока по схемам импульсных преобразователей. Энергоподсистема в этом случае реализуется в соответствии со схемой: источник переменного тока — выпрямитель с СФ —

конвертор ЗПТ — ШИП — ИД. Конвертор обычно строится на базе индуктивного импульсного преобразователя дроссельного или трансформаторного типа, что позволяет формировать кривую сетевого тока, близкую к гармонической, обеспечивая высокие энергетические показатели ЭП.

В случае когда значение энергии, которая может быть возвращена в ЗПТ, велико и практическая реализация требуемой батареи конденсаторов СФ неприемлема, а вариант с тормозной цепью не дает экономии при использовании электроэнергии, то реализуется энергоподсистема ЗС электропривода с двусторонним энергопотреблением, т.е. с инвертором рекуперации.

Для анализа энергетических процессов в ЭП ЗС электропривода в предельных динамических режимах работы целесообразно применить методику, использующую диаграмму нагрузки привода в области располагаемых моментов и скоростей [3]. Введем следующие базовые величины: скорость ИД  $\Omega_6 = \Omega_{x,x}$ , напряжение ЗПТ  $E_6 = U_6 = c'_E \Omega_{x,x}$ , ток короткого замыкания ИД  $I_6 = I_{к.з} = U_6 / r_y$ , момент  $M_6 = c'_M I_{к.з}$ , мощность  $P_6 = U_6 I_6$ , энергия  $W_{max} = W_6 = J_\Sigma \Omega_6^2 / 2$ , где  $J_\Sigma$  — приведенный момент инерции ИД с нагрузкой,  $T_M = J_\Sigma \Omega_6 / M_6$  — электромеханическая постоянная времени,  $r_y$  — сопротивление обмотки якоря ИД,  $c'_M$  и  $c'_E$  — конструктивные коэффициенты ИД,  $\eta_{ИД} = M_6 \Omega_6 / I_6 E_6 = c'_M / c'_E$  — КПД ИД.

При проектировании энергоподсистемы необходимо определить максимальные электромагнитные нагрузки на ее элементы. Наиболее тяжелым режимом работы ЭП ЗС электропривода с ШИП, при котором эти нагрузки максимальны, является режим периодического реверса скорости двигателя с выходом в зону ограничения тока якоря на заданном уровне  $I_0$ . Для этого режима электромагнитные и энергетические процессы в ЭП ЗС электропривода на интервалах разгона ИД, движения с установившейся скоростью и торможения в течение времени  $T_{п}$  подробно рассмотрены в работе [4]. Время рекуперации определяется согласно уравнению

$$t_{рек} = (\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0) T_M / (\bar{I}_0 + \bar{I}_{ст}),$$

где  $I_{ст}$  — ток, обусловленный статическим моментом нагрузки;  $\Omega_y$  — заданное значение скорости ИД в установившемся режиме, т.е. на интервале движения с постоянной скоростью.

Кинетическая энергия вращающихся частей электропривода на интервале рекуперации определяется как

$$\bar{W}_{рек} = \bar{\Omega}_y^2 - \bar{I}_0^2.$$

С учетом того, что эта энергия за время рекуперации рассеивается в якорной цепи машины и заряжает конденсатор СФ, т.е. является суммой двух составляющих, получим формулу для определения значения энергии, запасаемой в конденсаторе СФ:

$$\bar{W}_C = \bar{I}_0 (\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0)^2 / (\bar{I}_0 + \bar{I}_{ст}). \quad (1)$$

Энергия, потребляемая из звена постоянного тока в течение интервалов разгона  $t_p$ , движения с установившейся скоростью  $t_y$  и торможения  $t_t$  ИД, т.е. за время  $T_{п} = t_t + t_p + t_y$ , определяется выражением

$$\bar{W} = \left[ \frac{\bar{I}_0^3}{\bar{I}_0 + \bar{I}_{ст}} + \frac{\bar{I}_0 \bar{\Omega}_y (\bar{\Omega}_y + 2\bar{I}_0)}{(\bar{I}_0 - \bar{I}_{ст})} + 2\bar{I}_{ст} \left( \frac{T_{п}}{T_M} - \frac{2\bar{\Omega}_y \bar{I}_0}{(\bar{I}_0^2 - \bar{I}_{ст}^2)} \right) (\bar{\Omega}_y + \bar{I}_{ст}) \right] \frac{1}{\eta_\Sigma}, \quad (2)$$

где  $\eta_\Sigma = \eta_{ИД} \eta_{ШИП}$ ,  $\eta_{ШИП}$  — КПД широтно-импульсного преобразователя.

Исходя из электромеханических (низкочастотных) процессов в ЭП ЗС электропривода, когда тормозная цепь и инвертор рекуперации не используются, можно установить соотношение для определения емкости конденсатора СФ из условия ограничения напряжения на нем на заданном уровне  $\bar{U}_{C_{\max 3}}$  в режиме рекуперации:

$$C_{\phi 1} = \left[ \bar{W}_C T_M - (2\bar{I}_{ст} / f) \right] / \left[ r_{я} \left( \bar{U}_{C_{\max 3}}^2 - 1 \right) \right],$$

где  $f$  — частота пульсаций выпрямленного напряжения в звене постоянного тока.

Согласно условию минимально допустимого снижения напряжения  $\bar{U}_{C_{\min}}$  на конденсаторе СФ на интервале разгона при заданном уровне токоограничения  $\bar{I}_0$  его емкость определяется как

$$C_{\phi 2} = 2\bar{I}_0 / \left[ r_{я} \left( 1 - \bar{U}_{C_{\min}}^2 \right) f \right].$$

Для определения спектра токовых воздействий кривая тока, потребляемого из ЗПТ, представляется в виде ряда Фурье. Расчетные соотношения, связывающие амплитудные коэффициенты ряда Фурье кривой тока ЗПТ (его низкочастотной составляющей) с параметрами ИД и режима работы всего электропривода, приведены в работе [4]. Используя область допустимых пульсаций напряжения в ЗПТ в функции частоты токовых воздействий, можно определить значения емкости конденсатора СФ и его номинального напряжения, обеспечивающие надежную работу силовых ключей ШИП.

Полученные зависимости (1) и (2) позволяют соотнести энергию  $\bar{W}_C$ , которая может быть возвращена в звено постоянного тока, с потребляемой из него энергией  $W$  за время  $T_{\Pi}$  при заданных параметрах нагрузки и режима работы, что дает возможность сравнить эффективность различных способов использования энергии рекуперации и определить целесообразность использования инвертора рекуперации в составе ЭП ЗС электропривода. Таким образом, приведенная методика и найденные зависимости позволяют решать вопросы структурно-параметрической оптимизации (синтеза) ЭП систем приборного электропривода.

На начальном этапе работы приходится принимать решения в условиях неопределенности. Чаще всего это относится к построению или выбору варианта структуры объекта проектирования, т.е. к задачам структурной оптимизации. Для рассматриваемых энергоподсистем приборных электроприводов возможны три варианта проекта в зависимости от соотношения расчетных величин  $C_{\phi 1}$  и  $C_{\phi 2}$ :

- при  $C_{\phi 2} \geq C_{\phi 1}$  выбирается конденсатор СФ емкостью  $C_{\phi 2}$ , применение ИР не требуется и реализуется структура ЭП с односторонним потреблением электроэнергии;
- при  $C_{\phi 1} > C_{\phi 2}$  возможны два случая:
  - выбирается конденсатор СФ емкостью  $C_{\phi 1}$ , применение ИР не требуется и реализуется структура ЭП с односторонним потреблением электроэнергии;
  - выбирается конденсатор СФ емкостью  $C_{\phi_{\min}}$  и реализуется структура ЭП с двусторонним энергопотреблением, т.е. с использованием ИР.

Поскольку вариант ЭП с тормозной цепью является самым неэкономичным с точки зрения использования электроэнергии (энергия рекуперации преобразуется в тепло), то выбор этого варианта осуществляется проектировщиком индивидуально.

Таким образом, посредством некоторого перебора различных структур построения проектируемого объекта может быть осуществлена структурная оптимизация устройства. Выбор варианта структуры позволяет устранить неопределенность, что обеспечивает возможность построения математической модели и проведения на ее основе параметрической оптимизации.

В ходе решения задачи оптимизации необходимо определить множество параметров элементов ЭП, обеспечивающих требуемые показатели при заданных ограничениях на множество внутренних переменных [5]. Общие рекомендации по выбору выходных параметров и назначению целевой функции следующие:

- КПД энергоподсистемы должен быть максимальным;
- энергетические показатели ЭП задаются согласно действующему стандарту;
- при условии обеспечения электрических характеристик желательно минимизировать массу и габариты устройства.

Ограничение электромагнитных нагрузок на заданном уровне позволяет снизить массу и габариты ЭП, что приводит, однако, к снижению предельных динамических возможностей электропривода.

В простейшем случае целевая функция представляет собой линейную комбинацию нормированных переменных модели с весовыми коэффициентами  $Y_j$ :

$$S = Y_T Q / Q_0 + Y_C C / C_0 + Y_E (1 - \eta) + Y_{\Sigma i} (1 - K_i) + Y_F |f_{kk} - f_{k0}| + Y_I |\alpha_k - \alpha_0| / \alpha_0 + Y_U |\beta_k - \beta_0| / \beta_0 + Y_\Phi |\varphi_k - \varphi_0| / \varphi_0,$$

где  $Q_0$ ,  $C_0$ ,  $f_{k0}$ ,  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\varphi_0$  и  $Q$ ,  $C$ ,  $f_{kk}$ ,  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$ ,  $\varphi_k$  — соответственно начальные и текущие значения массы трансформатора, емкости конденсатора СФ, частоты коммутации ШИП, коэффициентов ограничения по току и напряжению, коэффициента экономической эффективности;  $\eta$  — КПД энергоподсистемы;  $K_i$  —  $i$ -й показатель качества энергопотребления ЭП.

При составлении целевой функции разработчик ограничивает, исключает или дополняет ее требуемыми переменными исходя из технического задания на разработку ЭП системы приборного электропривода. Весовые коэффициенты  $Y_j$  также задаются на этапе экспертной оценки.

Рассмотренная задача поиска оптимального проекта энергоподсистемы ЗС электропривода относится к классу задач нелинейного программирования. Задача сводится к поиску численным методом экстремума (минимума) целевой функции, зависимость которой от внутренних переменных установлена аналитической моделью ЭП. Таким образом, если в процессе оптимизации будет найден глобальный минимум, это будет означать, что спроектированная ЭП системы приборного электропривода соответствует требованиям оптимальности. Решение оптимизационной задачи может быть осуществлено с использованием приведенных в работе [5] методов и алгоритмов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию по НИР НК-430П ГК №П2479 от 19.11.2009 г. (мероприятие №1.2.2) по направлению „Многофункциональное приборостроение для промышленных систем управления“ в рамках ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 гг.“.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SEW Eurodrive. Практика приводной техники. 1996. Т. 7.
2. Сабинин Ю. А. Позиционные и следящие электромеханические системы: Учеб. пособие для вузов. СПб: Энергоатомиздат, 2001. 208 с.
3. Томасов В. С., Синицын 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.
4. Борисов П. А., Томасов В. С. Методика выбора наиболее эффективного способа использования энергии рекуперации в системах электропривода на базе ШИП—ДПТ в зависимости от режима работы // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2004. Вып. 15. С. 335—339.
5. Банди Б. Методы оптимизации: Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988.

*Сведения об авторах*

**Павел Александрович Борисов**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем;  
E-mail: borisov@ets.ifmo.ru

**Дмитрий Вячеславович Лукичев**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем;  
E-mail: ludimit@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
электротехники и прецизионных  
электромеханических систем

Поступила в редакцию  
04.06.10 г.