

В. О. КОТЛЯРОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
Т. Ю. КУНЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
А. В. ЛЕКАРЕВИЧ, магистр электромеханики, менеджер ООО «ВЛАДАР», Харьков;
А. А. НИКИФОРОВА, магистрант, НТУ «ХПИ».

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИЗМАХ

Проектирование мехатронных систем – это сложный многоэтапный итерационный процесс, который нуждается в изучении, оптимизации и автоматизации. Не последнее место среди причин его сложности занимает развитие элементной базы и теории управления, ведущее к постоянному расширению пространства поиска проектных решений. Выбор лучших решений становится сложно делать «вручную», а их полный перебор за ограниченное время с учетом всех особенностей и предъявляемых требований оказывается в принципе невозможным даже с помощью САПР. Автоматизация проектирования в таких условиях требует применения особых методов и средств, обеспечивающих автоматическое принятие проектных решений или способных, как минимум, классифицировать уже имеющиеся знания о проектировании по степени их относительной важности.

Характерным примером сложности принятия проектных решений является структурный и параметрический синтез систем управления (СУ) электроприводов (ЭП) машин и механизмов с существенными потерями энергии во фрикционной нагрузке и в механических передачах. Известно, что эти потери не только снижают энергоэффективность, но и ухудшают качество процессов вплоть до потери устойчивости. К автоколебаниям в ЭП может вести, например, отрицательное вязкое трение (ОВТ) на падающем участке кинетической характеристики фрикционной нагрузки [1]. При определенных сочетаниях параметров электромеханической системы (ЭМС) работа ЭП на таком участке становится неустойчивой. На размер параметрических областей устойчивости ЭМС с ОВТ зачастую влияют и упругие связи, что требует проводить синтез СУ для многомассовых, по крайней мере, двухмассовых ЭМС (ДЭМС). Пример такой ДЭМС показан на рис. 1, где ОВТ представлено параметром β_c , значение которого зависит от многих величин, знакопеременно, непостоянно и точно не известно.

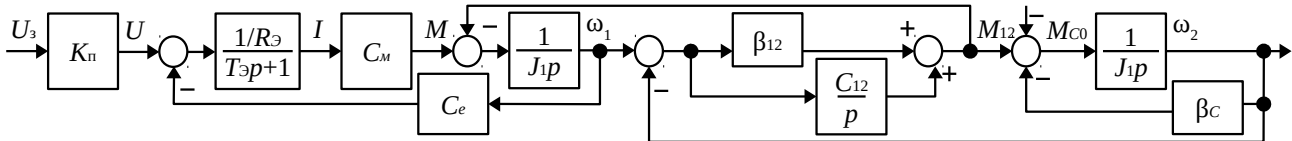


Рис. 1 Объект управления

Как показывают многочисленные исследования, например, [1, 2, 3, 4], в широком диапазоне параметров ни один из рекомендуемых для обеспечения устойчивости ДЭМС с ОВТ типов регуляторов не имеет однозначных преимуществ. В частности, ни один из них не гарантирует получение безусловно наибольших параметрических областей устойчивости. В зависимости от параметров ЭМС и предъявляемых требований лучшими оказываются разные структуры СУ, причем число рекомендаций по их выбору исчисляется многими десятками. Даже для опытного проектировщика, способного сразу, без анализа, исключить из рассмотрения заведомо неприемлемые варианты, принятие проектных решений в этой ситуации бывает сложным и трудоемким.

При проектировании СУ ЭП аналогичные проблемы могут создавать и потери в механических передачах, представленные на рис. 1 коэффициентом β_{12} . Его влияние на динамику замкнутых СУ может быть разнообразным, и, как будет показано ниже, оно до сих пор не вполне изучено в целом ряде случаев.

Постановка задачи. Для упрощения структурного и параметрического синтеза СУ ЭП с учетом потерь в нагрузке и в механических передачах необходимо создание компьютерных средств поддержки принятия проектных решений, базирующихся на знаниях о возможных маршрутах проектирования и других факторах, влияющих на сложность проектирования.

Приведем примеры такой сложности и ее причин. Ряд рекомендуемых для ДЭМС с ОВТ типов регуляторов представлен рис. 2,а, где показана схема процесса проектирования СУ. Для наглядности схема сильно упрощена, из нее исключены многие требования, альтернативы выбора, рекомендуемые методы синтеза. Тем не менее, и в усеченном виде она демонстрирует несколько возможных маршрутов проектирования. Выбор только одного из них не очевиден.

Процесс проектирования представлен на рис. 2,а в виде сети Петри, имеющей при создании САПР ряд преимуществ по сравнению с блок-схемами алгоритмов и другими моделями процессов.

Сеть является исполняемой моделью, показывающей динамику выполнения проектных операций. Имеется и развитый математический аппарат, позволяющий анализировать свойства сети, а значит и свойства маршрутов проектирования, такие как достижимость желаемого результата при заданных исходных данных.

Условные обозначения

- Проектная операция
- Исходные данные и решения
- Результаты проектирования
- Состояние процесса проектирования

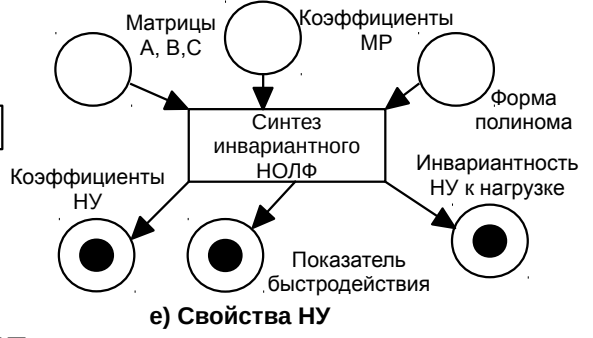
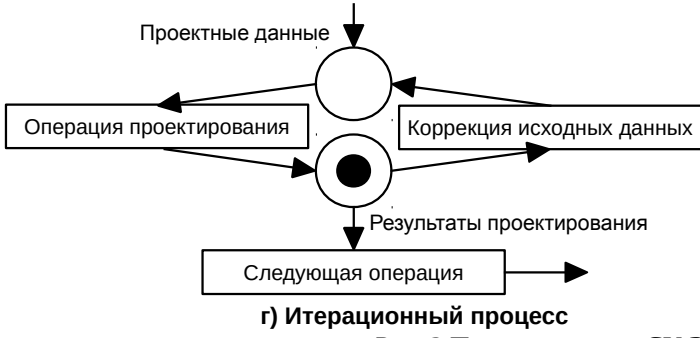
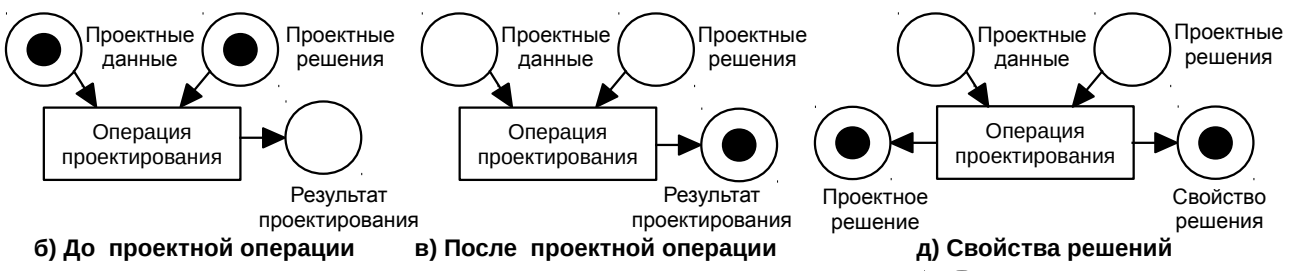
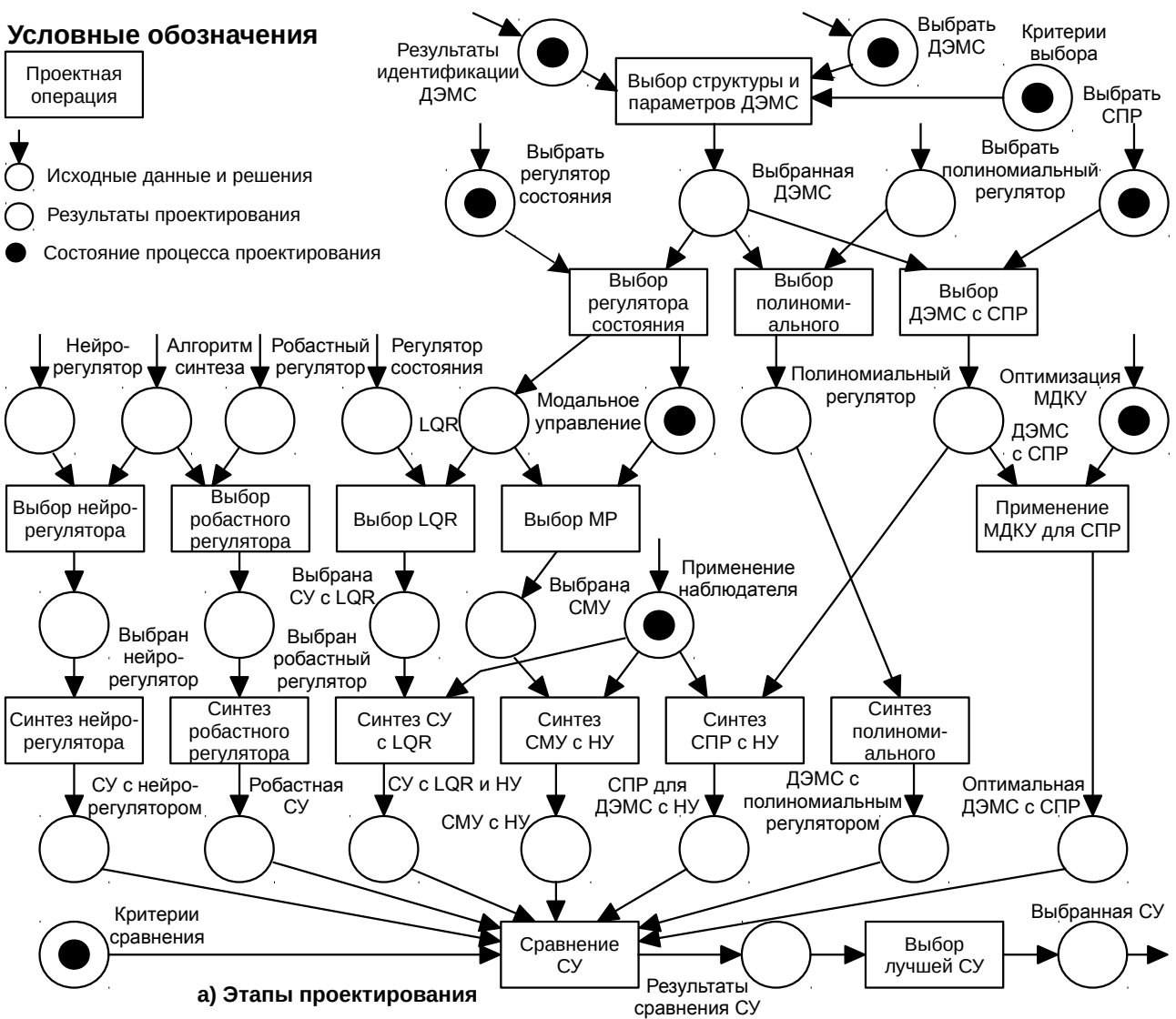


Рис. 2 Процесс синтеза СУ ЭП с учетом потерь

Сеть Петри моделирует события, зависящие от выполнения заданных условий, и строится из элементов двух типов – переходов, изображенных прямоугольниками, и мест, изображенных окружностями. Переходы на рис. 2 показывают проектные операции или этапы, а места обозначают исходные данные, проектные решения, требования и другие условия, выполнение которых необходимо для проведения операций.

Места и переходы в сети соединяются дугами, показывающими передачу проектной информации. Уже выполненные условия, позволяющие перейти к следующим операциям, обозначают динамическими элементами сети – маркерами, изображаемыми в местах кругами. Выполнению проектной операции в сети Петри соответствует так называемое срабатывание перехода, при котором маркеры из мест на входе перехода перемещаются в места на его выходе (рис. 2,б и в). Для срабатывания перехода все места на его входе должны быть помечены. Точнее, переход считается разрешенным, если в каждом входном месте число маркеров не меньше числа дуг, идущих из места в переход. Если разрешены несколько переходов, то сработать может любой из них, его выбор выполняется недетерминировано или определяется внешними факторами.

Легко моделируется в сети Петри и цикличность процесса, пример которой показан на рис. 2,г.

Места на выходе перехода представляют результаты проектной операции. Ими могут быть проектное решение в целом и его отдельные свойства (рис. 2,д). На рис 2,е для наблюдателя, оценивающего линейную функцию переменных состояния ДЭМС (НОЛФ), как отдельный результат проектирования показана инвариантность наблюдателя к нагрузке ЭП.

На рис. 2,а видно, что в сети уже задано использование ДЭМС, модального регулятора (МР) и наблюдающих устройств (НУ). Переход, обозначающий выбор ДЭМС, уже разрешен, далее разрешенным станет выбор регулятора состояния ДЭМС. Процесс проектирования будет развиваться до получения выбранной СУ.

Обзор включенных в схему на рис. 2 регуляторов состояния для ЭМС с ОВТ, в том числе модальных, оптимальных по линейно-квадратичному критерию (LQR), робастных и многих других, приведен в [1]. Синтез полиномиальных регуляторов для таких систем рассмотрен в [2], а примеры синтеза нейрорегуляторов даны в [3]. Во всех этих случаях эффективность регуляторов сильно зависит от объекта управления, его моделей при синтезе регулятора и наблюдателя (которые могут не совпадать) и предъявляемых к СУ требований.

Ситуацию усложняет дальнейшая детализация процесса проектирования при переходе от структурного синтеза к параметрическому. О возникающих при этом проблемах проектирования ЭП с учетом потерь в механизмах и нагрузке позволяют судить следующие примеры.

Для ДЭМС с ОВТ, замкнутой через МР с НУ, иногда существует локальный максимум параметрических областей устойчивости при среднем быстродействии НУ некоторых типов. Но условия реализации этого максимума в общем случае не определены, а число рекомендованных для его поиска структур СУ составляет более двух десятков. Они отличаются порядком НУ, используемым для коррекции НУ выходом, оцениваемой частью вектора состояния ДЭМС, функциями наблюдателя, его свойствами (робастность, инвариантность) и другим.

Результат поиска проектных решений зависит и от широкого контекста проектной ситуации, например, от выбора инструментов проектирования, который тоже нуждается в обосновании. Так, для синтеза СПР с учетом ОВТ был предложен ряд нестандартных настроек и методов оптимизации. К ним относится представленная на рис. 2 оптимизация методом диаграмм качества управления (МДКУ) [4]. Оптимизация этим методом ведется на основе минимаксного критерия в многомерном пространстве нескольких параметров и показателей качества. Используемые диаграммы качества управления (ДКУ) представляют собой фигуры в многомерном пространстве таких параметров, как контурный коэффициент передачи системы, постоянные времени регулятора, показатель колебательности, перерегулирование. ДКУ часто имеют вид оврага с плоскими и крутыми склонами, на дне которого находятся оптимальные параметры. При их поиске рассматривают двумерные сечения ДКУ, тогда качество управления представлено либо изолиниями равного показателя колебательности, либо изолиниями равного перерегулирования. На этих изолиниях имеются экстремальные точки параметров регулятора, множество которых образует линию максимальной добротности и запаса устойчивости (МДУ). Движение вдоль МДУ позволяет найти предельно улучшенный баланс конфликтующих показателей качества. В области повышенной добротности и запаса устойчивости имеются две характерные точки, отвечающие либо максимальной добротности, при заданном запасе устойчивости, либо максимальному запасу устойчивости при заданной добротности. Между ними и ищется оптимум.

К сожалению, как и другие известные методы оптимизации и настройки, МДКУ для ДЭМС с ОВТ эффективен не всегда. Насколько успешной будет оптимизация в каждом конкретном случае заранее точно не известно. Судить об этом можно, только если оптимизация уже была проведена, на основе опыта проектирования.

Для синтеза СУ ЭП с учетом потерь энергии можно указать и другие примеры возможного, но не гарантированного оптимума. Так, сильное влияние на устойчивость СУ иногда оказывают потери в механических передачах, например, редукторах. На рис. 1 эти потери представлены параметром β_{12} . И здесь, как и для ОВТ в нагрузке, тоже проявляются существенные различия в эффективности разных проектных решений. Проблема является даже более сложной, так как для некоторых видов СУ влияние внешнего и внутреннего трения в механических передачах (МП) – в редукторах, передачах винт-гайка, ременных, зубчатых – в сравнении с фрикционной нагрузкой изучено в меньшей степени. К таким СУ относятся, например, СМУ с наблюдателями состояния (НС). При их синтезе потери в редукторе обычно не учитывают или учитывают неточно, в результате может нарушаться устойчивость процессов именно вследствие потерь в МП [5].

Характеризующий потери в редукторе его коэффициент полезного действия определяется трением в зацеплении и подшипниках, потерями на перемешивание и разбрызгивание масла (потери гидравлического зацепления) и многим другим. Реальные значения КПД редукторов могут сильно отличаться от номинальных вследствие погрешностей изготовления и установки, режима эксплуатации и износа.

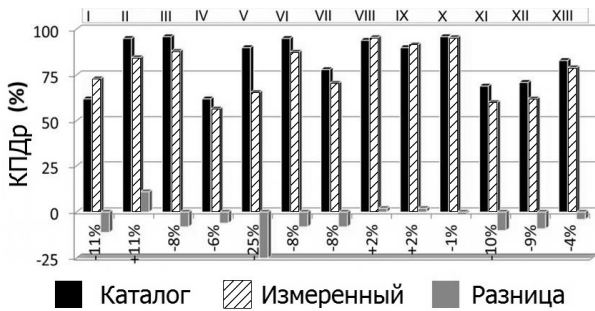
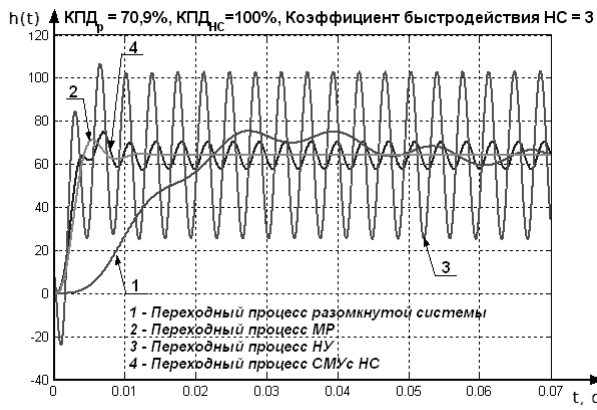
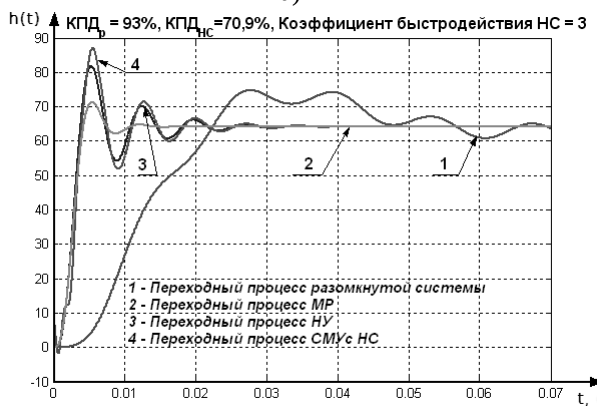


Рис. 3 Потери в редукторах



а)



б)

Рис. 4 Процессы в СМУ с НС

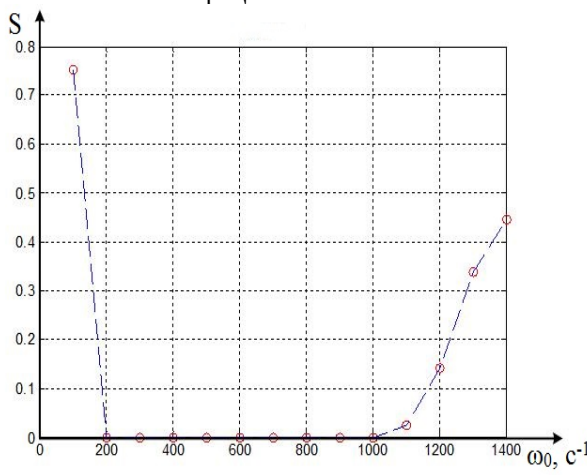


Рис. 5 Величина областей неустойчивости СУ ЭП

Известные экспериментальные данные о разнице реальных значений КПД и значений по каталогам производителей показаны на рис. 3.

Отличия действительного значения коэффициента полезного действия KPD_p от его значения $KPD_{нс}$, принятого при синтезе СУ с НС, требуют соответствующих проектных решений. Если ограничиться рассмотрением только линейных стационарных НС, то применение СМУ при существенных потерях в редукторе может приводить к неустойчивости, видной на графиках переходных функций $h(t)$ СМУ (рис. 4,а). Но она устраняется выбором значения $KPD_{нс}$, например, заведомо меньшего любого действительного значения KPD_p (рис. 4,б).

Как выяснилось, размер и положение параметрических областей неустойчивости на плоскости параметров KPD_p и $KPD_{нс}$ зависит от выбора координат ДЭМС для коррекции НС и от показателей быстродействия СМУ и быстродействия НС (относительно СМУ). Существуют значения этих показателей, при которых величина областей неустойчивости минимальна. Типичная зависимость относительного размера S областей неустойчивости от показателя быстродействия СМУ ω_0 приведена на рис. 5. Размер областей указан относительно всей площади исследованного пространства параметров KPD_p и $KPD_{нс}$. Но такие локальные минимумы наблюдаются не всегда, они зависят от параметров ДЭМС, типа регулятора и наблюдателя. И сведения о них получены эмпирически, в ходе моделирования. Поэтому решать, проводить или не проводить какой-либо вид оптимизации для какой-либо структуры СУ, можно только исходя из опыта проектирования.

Таким образом, структурный и параметрический синтез СУ представляет собой комплексную задачу со сложной структурой и множеством факторов, влияющих на конечный результат. Пространство поиска и критерии отбора решений образуют систему взаимосвязанных знаний, часто эмпирических, и требуются специальные средства автоматизации выбора знаний для применения. Необходима методика проектирования СУ, основанная на систематизации многочисленных, но разрозненных эмпирических сведений, которая позволит автоматически принимать проектные решения на основе известных рекомендаций по проектированию.

Следует учитывать, что сложность проектирования обусловлена не только большим числом вариантов выбора и трудностями предсказания их результатов. Проведенный анализ показывает, что методика проектирования ЭП с учетом потерь в механизмах не может быть сведена просто к выполнению заданного алгоритма проектирования, представленного блок-схемой или в другой подобной форме. Среди основных проблем алгоритмизации автоматизированного проектирования укажем следующее:

- отсутствие или сложность для практического использования точной зависимости показателей качества технического решения от входных параметров метода проектирования. Примером может служить связь прямых показателей качества процессов с косвенными, например, корневыми;
- отсутствие полной справочной информации по элементной базе ЭП;

– возможность функционально одинаковых технических решений, отличающихся процедурами проектирования;

– превышение количества оцениваемых показателей качества технического решения над количеством исходных данных. В качестве примера на рис. 6 показаны процедура проектирования НУ, ее исходные данные и результаты. Ясно, что влияние задаваемого быстродействия НУ сразу на столько показателей качества существенно усложняет проектирование;

– независимость некоторых характеристик и показателей качества управления от задаваемых параметров технических решений;

– зависимость эффективности оптимизации от начального приближения к оптимуму, выбираемого эмпирически или случайным образом;

– многокритериальность задач выбора технического решения и зависимость весовых коэффициентов в составной целевой функции от опыта проектирования;

– возможность нескольких близких квазиоптимальных решений. Незначительная разница между ними может заметно проявляться при выполнении последующих проектных процедур;

– отсутствие численных значений для некоторых показателей качества технических решений, таких как «удобство наладки». В рекомендациях по проектированию может говориться, например, о «малых» или «больших» значениях без их точного определения;

– эмпирические коэффициенты в аналитических расчетных зависимостях, заданные интервалом значений. Типичный пример такой зависимости – $\omega_{ОН} = (3...10) \omega_{ОМ}$, где $\omega_{ОМ}$ – показатель быстродействия модального регулятора (МР), $\omega_{ОН}$ – показатель быстродействия НС. Выбор значений из такого диапазона оставляется на усмотрение проектировщика в зависимости от условий, полный перечень которых обычно отсутствует;

Как видно, проектная ситуация характеризуется не только большим объемом необходимой для принятия решений информации, но и ее неполнотой, неточностью, неопределенностью, а часто и противоречивостью. Существенно снизить влияние этих факторов на качество выбора проектных решений позволяет применение в САПР методов искусственного интеллекта (ИИ).

Материалы исследования. В ИИ существуют разные подходы к преодолению перечисленных проблем. И, как представляется, в данном случае требуется сочетание методов ИИ, дополняющих друг друга. Именно такой подход использован в предлагаемой методике создания САПР ЭП. Она реализует последовательный переход от исходного описания задачи проектирования к ряду других описаний, отличающихся формой и степенью формализации, и обеспечивающих автоматический поиск проектных решений в базах знаний о проектировании. Методика включает в себя следующие этапы:

1. Сбор сведений об известных вариантах технических решений, представленных в виде текстовой и графической проектной документации, содержащихся в научных публикациях (статьи, монографии и т.п.) и других доступных источниках. Этот этап разработки соответствует решаемым на ранних стадиях проектирования задачам составления аналитических обзоров, патентного поиска, обследования объекта автоматизации и т.п.;

2. Представление собранной информации в виде информационной модели объекта проектирования. Модель создается на базе проектных решений, собранных на первом этапе, и дополняется необходимой уточняющей информацией. Средства создания таких моделей предоставляют многие существующие САПР, как общего назначения (например, конструкторские типа AutoCAD или схемные редакторы типа Microsoft Visio), так и специализированные средства управления жизненным циклом и проектными данными (PLM, PDM, TDM, CALS). Эти технологии и программные инструменты, разработанные для контроля и управления большими объемами технических данных при проектировании, обеспечивают управление всей информацией об изделии и связанных с ним процессах на протяжении всего его жизненного цикла, начиная с проектирования и до выведения из эксплуатации. Информационная модель может быть представлена и средствами систем управления базами данных. Примерами могут служить созданные базы данных по характеристикам трения и стандартным характеристическим полиномам. Тогда уже на этом этапе может создаваться модель самих знаний о проектировании в виде диаграмм сущность-связь (ERD). Процедурные знания на этом этапе представляются в форме блок-схем алгоритмов, диаграмм деятельности на языке UML, функциональных диаграмм IDEF0, диаграмм потоков данных DFD, сетей Петри;

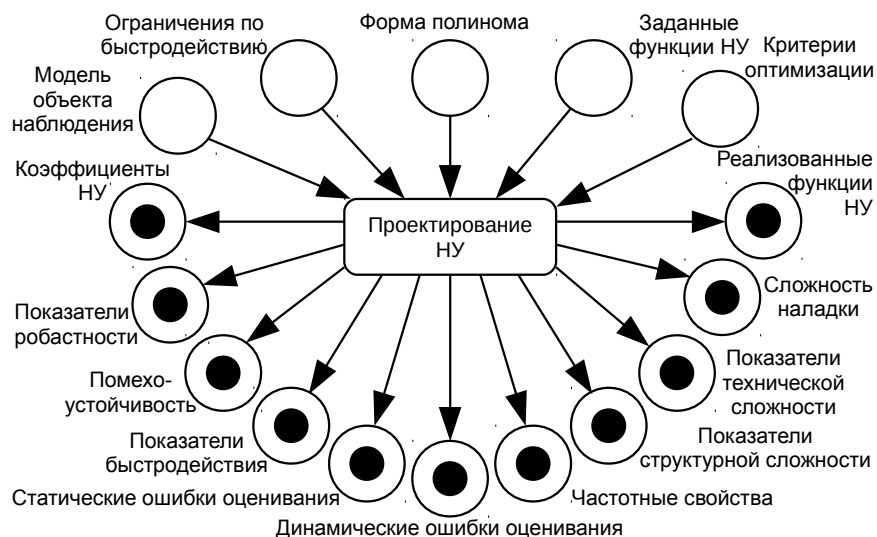


Рис. 6 Показатели качества проектирования НУ

3. Преобразование проектных данных методами интеллектуальной обработки данных. Представленные в информационной модели сведения подвергаются анализу с целью выделить группы, множества, классы проектных данных и проектных решений с общими свойствами. Выполняются обобщение, классификация, фильтрация, кластеризация, редукция исходных сведений о проектных данных и решениях. Выделяются и именуется диапазоны параметров, области их применения, классы эквивалентности решений. Систематизируются основные понятия, термины, характеристики, используемые для описания проектных решений. Для классификации и кластеризации применяются как неформальные методы, основанные на знаниях эксперта в предметной области – в данном случае в проектировании СУ ЭП, так компьютерные методы датамайнинга;

4. Формализация всех знаний, перевод их в форму, позволяющую рассчитывать на однозначную интерпретацию, часто не обеспечиваемую естественным языком описания. Типичными примерами такой формы являются языки спецификаций, например, Z-нотация, языки системотехнического моделирования – SysML, BPMN и другие формальные языки проектирования;

5. Составление семантической сети, представляющей знания о проектировании в простой и наглядной форме, вместе с тем легко реализуемой и используемой существующими инструментальными средствами ИИ. Со-временные САПР обладают развитым лингвистическим обеспечением, и применение в них семантических сетей является продолжением этого направления развития.

Семантическая сеть (смысловая сеть) — это модель предметной области, представленная в виде графа, вершинами которого являются понятия, а ребрами – отношения между ними, связи понятий. Как модель знаний о проектировании эти сети имеют существенные преимущества: описание знаний создается на уровне, близком к естественному языку; обеспечивается легкость объединения моделей знаний; возможные отношения между понятиями образуют небольшое и хорошо формализованное множество; из полной сети, представляющей все знания, легко выделить участок, который необходим для поиска знаний в каждом конкретном случае.

Пример фрагмента такой сети, представляющей знания о проектировании СУ с учетом потерь в редукторах, показан на рис. 7. Этот этап обеспечивает преодоление разрыва между высокоуровневым описанием знаний, используемым человеком, и их компьютерным представлением. Представленные в виде семантической сети знания могут интерпретироваться, использоваться для анализа и поиска проектных решений не только проектировщиком, но и компьютерными программами, реализующими алгоритмы искусственного интеллекта и проектирования. Используя специализированные языки, проектировщик может формулировать запросы на поиск проектных решений, ответы на которые будет искать САПР с помощью машин логического вывода, методом шаблона и другими средствами.

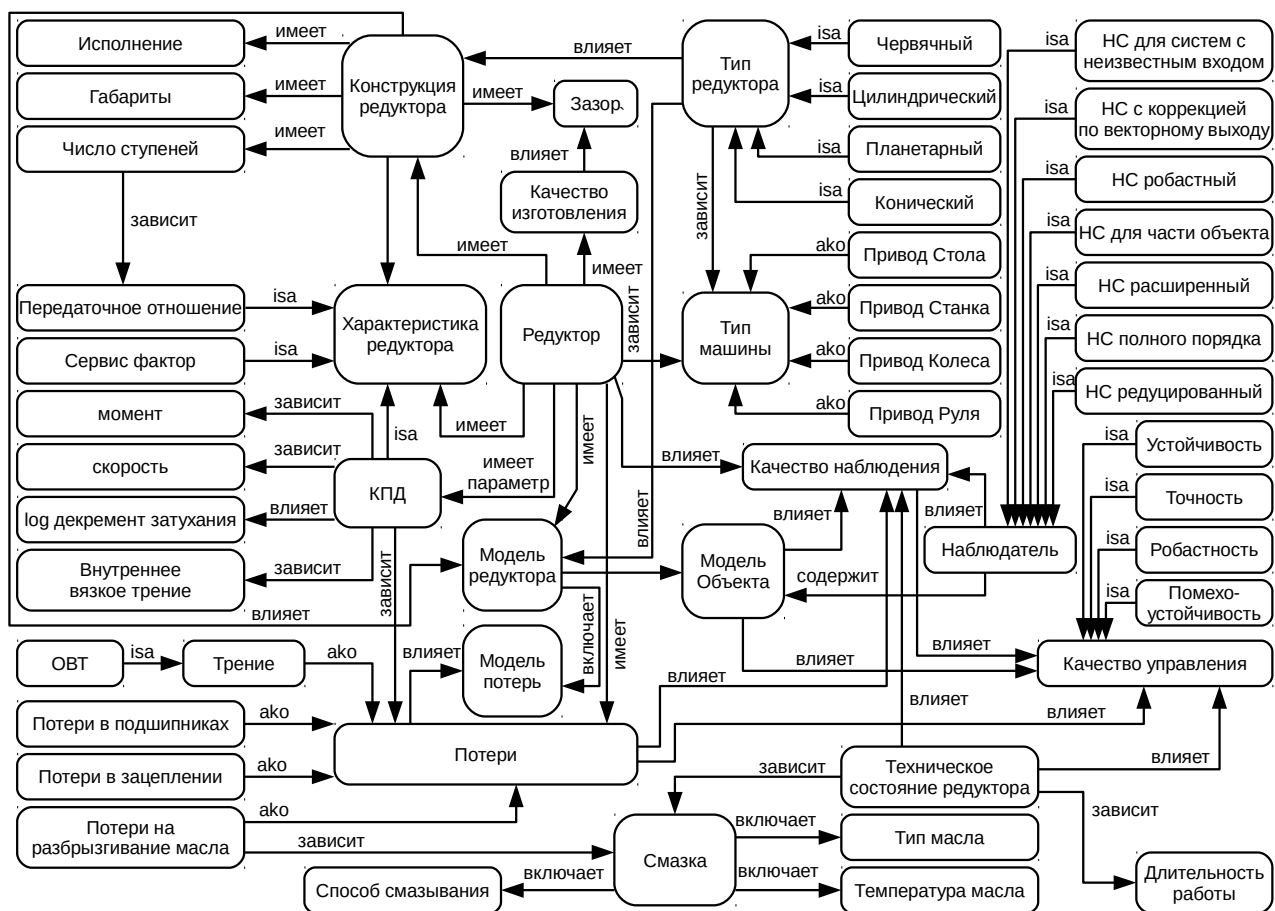


Рис. 7 Семантическая сеть знаний о проектировании

В показанную на рис. 7 сеть включены факторы, которые следует учитывать при проектировании СУ ЭП с учетом свойств редукторов. Эти факторы можно разделить на тематические группы: относящиеся к конструкции механической передачи; относящиеся к режиму работы и особенностям эксплуатации ЭП; определяющие потери энергии в механической передаче; относящиеся к классификации типов механизмов и передач; влияющие на создание модели объектов управления и наблюдения с учетом особенностей механической передачи; относящиеся к выбору и анализу характеристик объектов управления и наблюдения; относящиеся к структурному и параметрическому синтезу наблюдателей, например, известные типы наблюдающих устройств.

Элементами сети являются перечисленные факторы и относящиеся к ним понятия, такие как передаточное отношение, качество управления, качество изготовления, длительность работы и т.д. Эти понятия связаны между собой отношениями, такими как «влияет», «зависит», «имеет», «включает». Например, понятия «Наблюдатель» и «Модель объекта» связаны отношением «содержит», которое означает, что в состав наблюдателя входит математическая модель объекта наблюдения и наблюдатель проектируется на ее основе. Некоторым отношениям на схеме сети присвоены стандартные условные обозначения, например, отношение «ako» означает связь подкласса понятия с классом, а «isa» – связь экземпляра какого-либо класса с самим этим классом. В частности, «Конический» – это экземпляр типов редукторов, а «Привод стола» – это один из подклассов механизмов, к которому относятся разные приводы разных столов;

6. Преобразование построенной семантической сети в модель знаний, близкую к ней по типу, но предоставляющую более широкие возможности как для представления знаний о проектных решениях и проектных ситуациях, так и для организации вычислительного процесса их поиска.

К таким моделям знаний относятся, в частности, концептуальные графы и онтологии. Как показал опыт создания САПР, предпочтительным является применение концептуальных графов. В сравнении с семантическими сетями и онтологическими средствами они с одной стороны достаточно просты для непосредственного использования проектировщиками СУ ЭП, а с другой стороны предоставляют широкий набор выразительных средств и методов, необходимый для адекватного представления и эффективного автоматического поиска знаний о проектировании.

Концептуальный граф (рис. 8) – это конечный связный двудольный граф, вершины которого представляют понятия и концептуальные отношения. На рис. 8, а вершины «НУ» и «Порядок» представляют концепты (понятия), а «имеет свойство» – концептуальное отношение. Чтобы различать типы вершин, понятия представляют прямоугольниками, а концептуальные отношения – эллипсами. Каждый концептуальный граф представляет собой высказывание, описывающее предметную область, в данном случае проектирование СУ ЭП. База знаний состоит из многих таких графов, часто сотен и тысяч.

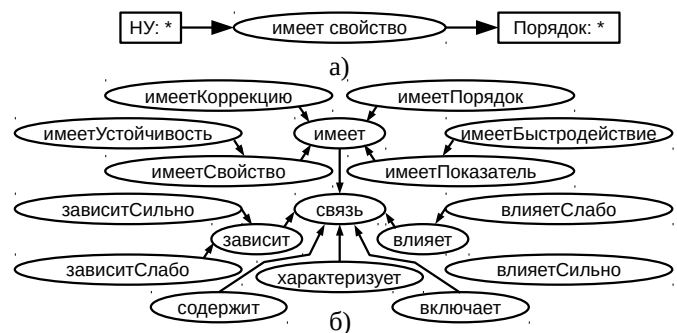


Рис. 8 Концептуальный граф

Концептуальные графы позволяют определять не только понятия и связи между ними, но и классы понятий и связей. Это расширяет возможности описания и поиска проектной информации, дает возможность выделять общие свойства классов и переносить их на подклассы. Например, если проектировщика интересует возможность влияния какого-либо параметра на заданное свойство СУ, такое как устойчивость, то при поиске в концептуальном графе автоматически будут найдены случаи как сильного, так и слабого влияния, если эти виды связей между понятиями «устойчивость» и «параметр» определены так, как показано на рис. 8, б.

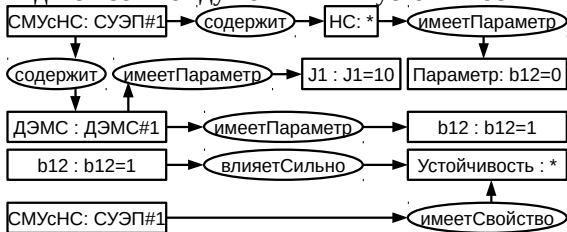


Рис. 9 База знаний САПР

Инструментальные средства создания сетей позволяют определять и правила логического вывода знаний, такие как транзитивность связей, например, «Если А влияет на В, а В влияет на С, то А влияет на С».

Простой пример представления знаний о проектировании СУ ЭП в виде концептуального графа показан на рис. 9. На рис. 10 показан пример запроса к базе знаний, заданного в такой же форме. Ответ САПР на него тоже будет концептуальным графом. В данном случае будут найдены факторы, влияющие на устойчивость разных вариантов замкнутых ДЭМС, и все параметры этих ДЭМС;

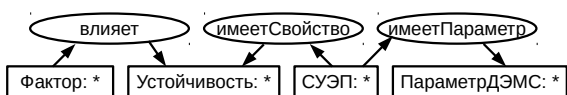


Рис. 10 Запрос к базе знаний

Классификатор автоматически выбирает или ранжирует возможные решения по их описанию и исходным проектными данными. Решения о целесообразности структуры и параметрах СУ принимаются на основе анализа содержащихся в базе знаний примеров, имеющих общие признаки с рассматриваемой проблемой проектирования. Схематично этот процесс показан на рис. 11. В настоящее время известно значительное число (более 150) типов классификаторов и инструментальных программных средств их построения и применения.

Для использования в САПР ЭП были выбраны классификаторы в виде деревьев решений, сетей Байеса, продукционных систем и нейронных сетей. Первые три типа позволяют в той или иной степени объяснять проектные решения и наглядны, нейронные сети имеют свои известные преимущества. Классификаторы могут строиться с помощью существующих инструментальных средств (KNIME, Weka и другие), но они рассчитаны на специалистов в области ИИ, а не электропривода. Поэтому требуется их адаптация, как минимум упрощение пользовательского интерфейса.

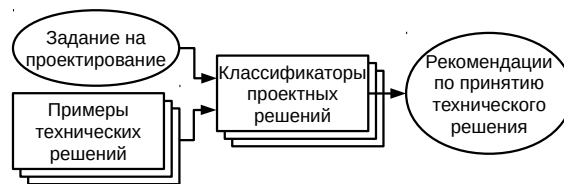


Рис. 11 Выбор проектных решений

8. Определение последовательности проектных операций средствами специализированных систем управления потоками работ (Scientific Workflow Management Systems). Этот этап создания САПР выполняется на базе схемы процесса проектирования, типа представленной на рис. 2. Он направлен на автоматизацию управления порядком проектирования и обеспечивает простоту сопряжения экспертной системы по проектированию ЭП на базе концептуальных графов с различными узкоспециализированными САПР, необходимыми на отдельных этапах проектирования, в частности, с созданными ранее базами знаний по характеристикам трения, стандартным формам характеристических полиномов и рядом других. Существуют многочисленные варианты реализации этого этапа, отличающиеся инструментальными средствами и методами организации взаимодействия модулей САПР. К настоящему времени рассмотрено применение в САПР ЭП с элементами ИИ таких программных продуктов как Scirun и MevisLab, показана целесообразность их применения и возможность расширения экспертной системой, автоматически адаптирующей маршруты проектирования к текущим результатам проектирования или предлагающей проектировщику подходящие варианты изменения. Однако окончательный выбор средств управления потоком работ требует дополнительных исследований и обоснования.

Все перечисленные этапы методики опробованы на практике и, как представляется, обеспечивают построение САПР, необходимой для эффективного проектирования СУ мехатронных систем с учетом потерь в механизмах ЭП.

Список литературы: 1. Котляров В.О., Осичев А.В. О результатах решения задач стабилизации систем с отрицательным вязким трением посредством применения наблюдающих устройств // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2008. – вип. 30. – С. 204-206. 2. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Клепиков В.Б., Пирожок А.В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой // Под общей редакцией В.Б. Клепикова. – Харьков: НТУ «ХПИ», Запорожье: ЗНТУ, 2002. – 160 с. 3. Клепиков В.Б., Асмолова Л.В., Обруч И.В. Срывные фрикционные автоколебания в электромеханических системах и их устранение // Техническая электродинамика. – Киев: ИЕД НАНУ. – 2007. – №2. – 35-41. 4. Кунченко Т.Ю. Параметрическая оптимизация условно устойчивых электромеханических систем методом диаграмм качества управления // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Харьков: ООО «ПЛАНЕТА-ПРИНТ». – 2016. 5. Марущак Я. Ю., Кушнір А. П. Експериментальні дослідження двомасових електромеханічних систем з урахуванням сил дисипації // Електротехнічні та комп'ютерні системи № 03 (79), 2011, С. 98-100.

Bibliography (transliterated): 1. V.O. Kotlyarov, A.V. Osichev O rezul'tatah reshenija zadach stabilizacii sistem s otricatel'nym vjazkim treniem posredstvom primenenija nabljudajushhijh ustrojstv // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – Harkiv : NTU «HPI». – 2008. – vip. 30. – S. 204-206. 2. L.V. Akimov, V.T. Dolbnja, V.B. Klepikov, A.V. Pirozhok Sintez uprashhennyh struktur dvuhmassovyh jelektroprivodov s nelinejnoj nagruzkoj // Pod obshhej redakciej V.B. Klepikova. – Har'kov: NTU «HPI», Zaporozh'e: ZNTU, 2002. – 160 s. 3. V.B. Klepikov, L.V. Asmolova, I.V. Obruch Sryvnye frikcionnye avtokolebanija v jelektromehaničeskijh sistemah i ih ustranenie // Tehničeskaja jelektrodinamika. – Kii: IED NANU. – 2007. – №2. – 35-41. 4. T.Ju. Kunčenko Parametricheskaya optimizatsiya uslovno ustojchivyh electromehaničeskijh sistem metodom kachestva upravleniya // Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehničeskijh nauk. – Har'kov: ООО «PLANETA-PRINT». – 2016. 5. Ja. Ju. Marushhak, A. P. Kushnir Eksperimental'ni doslidzhennja dvomasovijh elektromehaničnijh sistem z urahuvannjam sil disipacii // Elektrotehničnij ta komp'juterni sistemi № 03 (79), 2011, S. 98-100.

Поступила 30.05.2017