

Использование пентаграммы для структурирования процесса изучения электротехнических устройств

МАТВЕЕВ А.В.

Ускорение темпа появления и внедрения новых технологий в современном мире требует изменений в области инженерного образования. Большой объем знаний требуется передавать за более короткое время. В статье выносятся на обсуждение альтернативный взгляд на построение процесса изучения электротехнических устройств на примере электрических машин и преобразователей частоты. Предлагается использовать для организации и передачи знаний совокупность логических блоков, графически описанных пентаграммой – известным символом и геометрической фигурой. Предполагается, что данный метод передачи знаний будет более эффективным с точки зрения затраченного времени. Пентаграмма представляет собой набор связанных логических блоков, описывающих совокупность физических процессов, эффектов, их связей между собой и, возможно, даже философию построения электротехнических устройств.

Ключевые слова: электрические машины, преобразователи частоты, электротехнические устройства, изучение, преподавание, структура, логические блоки, пентаграмма

Ускорение темпа появления и внедрения новых технологий требует изменений в области инженерного образования. Большой объем знаний требуется передавать за более короткое время. Традиционные курсы, например «Электрические машины» или «Устройства силовой электроники», естественным образом уступают часть учебных часов курсам по новейшим технологиям. Таким образом, практически тот же набор знаний по традиционным электротехническим устройствам требуется передавать быстрее – за ограниченное число лекций и семинаров. Для того чтобы это стало возможным, вероятно, потребуется изменить структуру подачи материала и сместить акцент с деталей и многочисленных вариантов устройств на общее понимание взаимосвязи различных физических эффектов и процессов, характерных для определенного класса устройств.

В статье рассматриваются электротехнические устройства, в первую очередь электрические машины. Анализ содержания произвольно выбранных восьми учебников по электрическим машинам, четыре из которых могут претендовать на роль «общего курса» [1–4], и четыре можно охарактеризовать как учебники по специальным машинам [5–8], показывает, что в этих учебниках большое место отведено описанию принципов действия различных вариантов машин и математическому описанию процесса преобразования энергии. В то же время почти не говорится о практических аспектах производства, структуре стоимости машины, не всегда анализируются вибрации и шумы, редко рассматриваются варианты пространственных конфигураций – линейные машины, дисковые, конические, многослойные. Между тем все эти вопросы

не менее важны для профессионального электромеханика, чем понимание процесса преобразования энергии.

В табл. 1 приведен обзор содержания учебников [1–8] в части отражения достаточно важных для практикующих инженеров-электромехаников областей знаний, таких как электромагнитные силы, надежность, тепловой анализ и пр. Очевидно, содержание учебников очень разное. Например, тепловой анализ и вопросы проектирования включены во многие из выбранных учебников, в то время такой важный вопрос, как надежность и время службы машины, не рассматривается ни в одном из них. Учебник [4], например, вообще не касается ни одного из аспектов, перечисленных в табл. 1, описываются лишь принципы действия различных вариантов машин.

Если целью передачи знаний является подготовка специалиста по разработке машин, а не квалификация пользователя, то любая «однобокость» или дисбаланс в знаниях не допустимы. Например, проектирование электрической машины без виброакустического анализа чревато неприятностями уже на этапе испытаний.

Итак, чтобы получить, по крайней мере, поверхностное представление о всех необходимых аспектах разработки машин, студенту необходимо собирать информацию из многих учебников или других источников.

В методике, предлагаемой ниже, поставлена задача консолидации всей необходимой информации, при этом ставится достаточно амбициозная задача развития у студента широты кругозора профессионального разработчика, что обычно приходит с опытом. При этом, кроме прочего, ставка де-

Таблица 1

Обзор содержания современных учебников

Тематический раздел учебника	Общий курс				Специальные машины			
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
Электромагнитные силы	да	да	нет	нет	нет	нет	нет	нет
Шумы и вибрации	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да
Производство машин	нет	нет	да	нет	нет	нет	нет	нет
Структура стоимости	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да
Варианты пространственных конфигураций	нет	нет	нет	нет	нет	да	нет	да
Механические конструкции	нет	нет	да	нет	нет	нет	нет	нет
Надежность, время службы	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет
Вопросы проектирования	да	да	да	нет	да	да	да	нет
Тепловой анализ	да	да	да	нет	да	да	нет	нет

лается на специфику восприятия графической информации, по принципу «один рисунок стоит тысячи слов». С самого начала четко определяется и показывается набор знаний, которые предстоит приобрести. Набор знаний представлен («зашифрован») пентаграммой (рис. 1) – известным символом и геометрической фигурой, адаптированной в данном случае к целям обучения курсу электрических машин.

Пентаграмма состоит из узлов и треугольников. Узлом может быть объект, процесс или физический эффект. Узлы обозначены литерами, например: С – Силы, И – Источники поля, П – Потери. Треугольников – две группы, треугольники первой

группы, расположенные в центре пентаграммы, обозначены цифрами 1, 2 и так далее, треугольники второй группы – лучи пентаграммы – не имеют обозначений. Можно заметить, что треугольники первой группы имеют узлы в качестве вершин. Таким образом, объекты, процессы и эффекты оказываются объединенными в группы по три, их можно назвать «тройками» или «триадами».

Число лекций и семинаров может соответствовать числу элементов – узлов и триад. Основное содержание материала лекций и семинаров, соответствующее основным узлам пентаграммы, расположенным в центре пентаграммы и на пересечении ее линий, предложено в табл. 2.

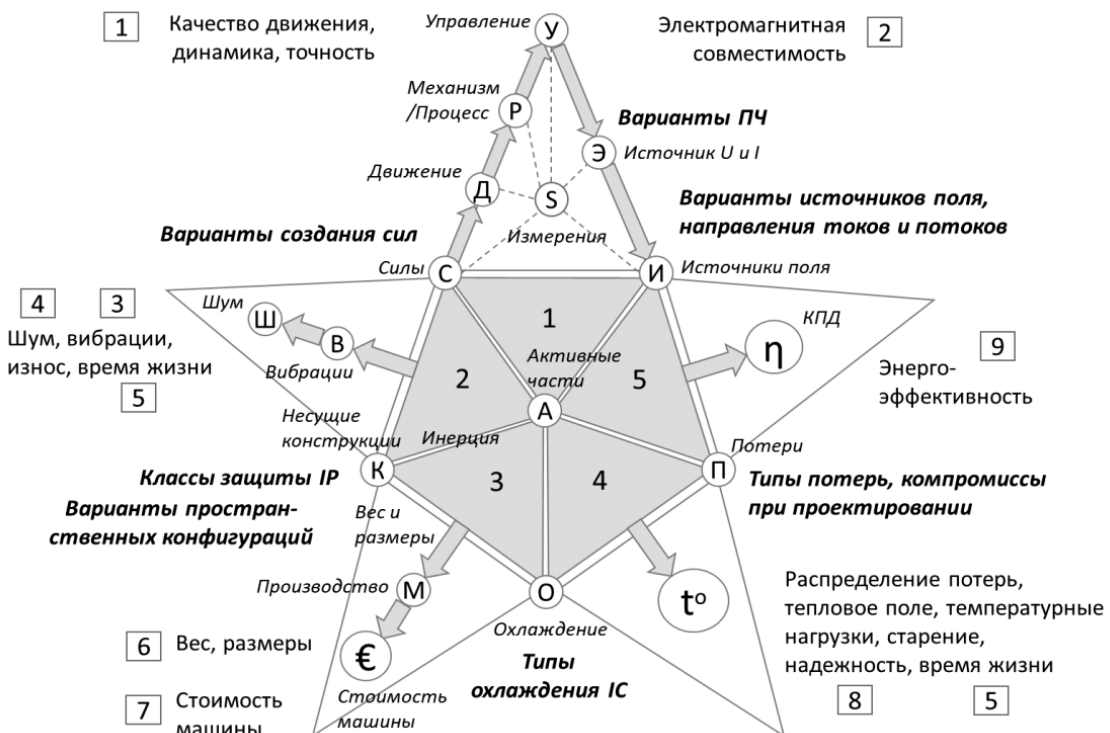


Рис. 1. Пентаграмма, адаптированная для изучения электрических машин

Основные узлы пентаграммы

Узлы	Основное содержание материала (пример)
(А) Активные части	Сердечники, проводники, изоляция, постоянные магниты. Топологии/схемы обмоток. Формы сердечников. Варианты пространственных конфигураций (по направлению магнитного потока через зазор): радиальные, аксиальные, линейные, планарные.
(И) Источники электромагнитного поля	Варианты источников поля; проводники с токами, постоянные магниты. Характеристики магнитов. Основные конфигурации источников поля, направление токов и потоков. Как напряжения на терминалах создают токи.
(С) Электромагнитные силы	Классификация по направлению: тангенциальные, радиальные, аксиальные силы. Места приложения сил (пример на рис. 2). Классификация механизмов создания сил. Методы расчета по энергии и ко-энергии, тензору натяжения. Методы расчета полей и сил, например МКЭ.
(П) Потери	Потери в сердечниках -- на гистерезис, вихревые токи. Потери в проводниках – АС и DC сопротивления. Потери в постоянных магнитах. Потери из-за высокочастотных эффектов от ПЧ. Механические потери.
(О) Охлаждение	Водяное, воздушное, водородное, смешанное. Искусственное, естественное. Механизмы теплопередачи; радиация, конвекция, проводимость. Стандарты (IC). Влияние высоты над уровнем моря.
(К) Несущие конструкции	Вал, подшипники, корпус, щиты. Варианты пространственных конфигураций несущих конструкций – соответствуют активным частям (Узел А). Пыле- и влагозащищенность (IP54, ...). Варианты установки (B3, B5, ...).

В частности, при работе с материалом, соответствующим узлам А и К, преследуется цель – показать студенту свободу выбора любой пространственной конфигурации, оптимальной для заданного применения, уводя его от стереотипа, что электрическая машина – это цилиндр с выступающим концом вала и клеммной коробкой сверху.

Следующий, более сложный уровень, – триады. Отметим, что в каждой из триад оказываются объекты или процессы, объединенные определенной логикой взаимозависимости. Можно сказать, что триады показывают объекты или процессы, между которыми сильные связи, в то время как связи между любыми двумя узлами пентаграммы, не принадлежащими к одной триаде, – слабые или вообще отсутствуют.

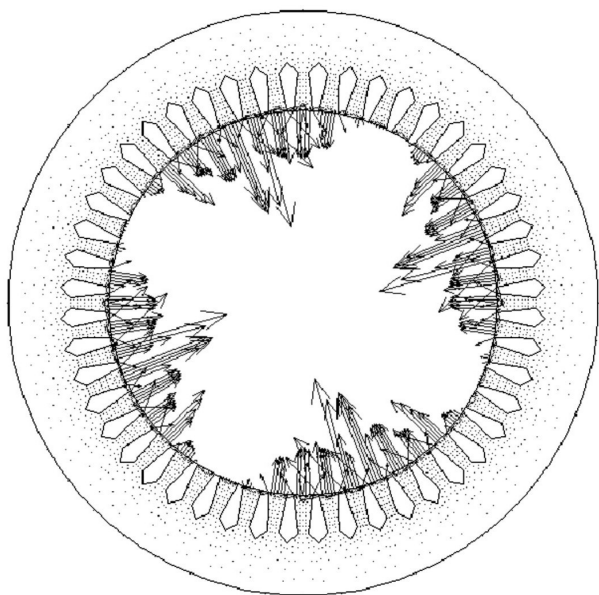


Рис. 2. Пример распределения электромагнитных сил, приложенных к зубцам статора асинхронной машины [9]

Польза триад в том, что появляется возможность усложнить подачу материала от уровня «элемент А влияет позитивно на элемент В» до уровня «элемент А влияет позитивно на элемент В, но при этом негативно влияет на элемент С». Например, от утверждения «выбор меньшей толщины яра статора позволит снизить массу машины» к утверждению «выбор меньшей толщины яра статора позволит снизить массу машины, но при этом возрастут потери в стали». Оперирова несколькими соседними триадами, можно добавить к данной логической цепочке, что «также снизится КПД и возрастут вибрации». Таким образом, вполне допустимо одновременное рассмотрение двух триад для построения более сложных логических цепочек. Именно понимание подобных взаимных связей характерно для опытных проектировщиков. Отметим также, что понимание связи трех элементов – не сложно для восприятия, поэтому триады, вероятно, являются оптимальным по размерности логическим блоком для передачи знаний. Содержание материала лекций и семинаров, соответствующее

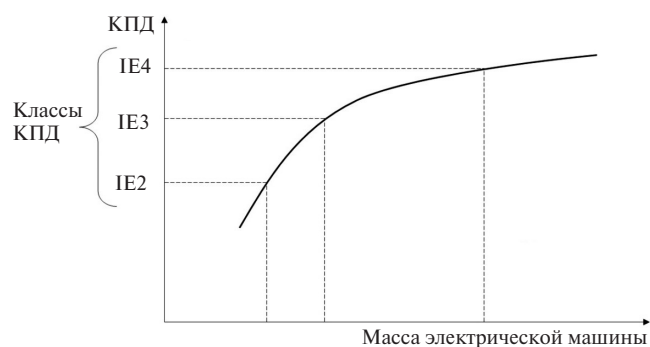


Рис. 3. График зависимости массы машины от требования к КПД

Таблица 3

Содержание материала лекций и семинаров, соответствующих триадам

Триады	Темы и содержание лекций (пример)
(1) Источники электромагнитного поля – активные части – электромагнитные силы	Тема лекции (или серии лекций) «Преобразование энергии и силы». Варианты источников поля. Варианты направлений токов и магнитных потоков. Варианты структур активных частей. Показать, каким образом источники электромагнитного поля, расположенные в активных частях, создают электромагнитные силы, действующие на активные части машины. Создание движения: поле → силы → движение. Принципы действия машин (АД, ДПТ, СМ, ...). Варианты создания и приложения сил. Векторы и векторный анализ. Распределение сил, приложенных к активным частям. Преобразование энергии. Активная и реактивная мощность, коэффициент мощности, $\cos\varphi$.
(2) Активные части – электромагнитные силы – несущие конструкции	Тема лекции «Силы, вибрации и шум». Варианты несущих конструкций. Классы защиты. Варианты активных частей. Варианты приложения сил. Каким образом тангенциальные и радиальные силы влияют на выбор конструкций и размеров несущих структур. Каким образом силы создают вибрации и акустический шум. Каким образом структура и размеры несущих конструкций влияют на вибрации и акустический шум. Износ, время службы, наработка на отказ, надежность.
(3) Активные части – системы охлаждения – несущие конструкции	Тема лекции «Машина как физический объект. Механическая конструкция». Проектирование, имея критерием минимальную стоимость, проектирование для автоматизированного производства. Интеграция системы охлаждения и несущих конструкций. Установка, наладка, обслуживание. Неисправности и ремонт. Варианты пространственных конфигураций активных частей и несущих конструкций. Типы систем охлаждения. Классы защиты. Показать, что сложность и стоимость производства зависит от пространственной конфигурации активных частей, несущих конструкций и систем охлаждения. Обслуживание, ремонтпригодность.
(4) Потери – активные части – системы охлаждения	Тема лекции «Генерация тепла и теплоотвод». Потери и генерация тепла. Источники тепла и их распределение в активных частях. Варианты пространственных конфигураций активных частей. Механизмы теплопередачи; радиация, конвекция, проводимость. Тепловое поле. Тепловые нагрузки, старение изоляции, надежность, время службы элементов машины. Повторно-кратковременные режимы работы. Типы потерь. Типы систем охлаждения. Компромиссы при проектировании.
(5) Источники электромагнитного поля – активные части – потери	Тема лекции «Энергоэффективность». Варианты источников поля. Варианты направлений токов и магнитных потоков. Варианты структур активных частей. Типы потерь. Источники поля и потери в активных частях. Энергоэффективность, КПД. КПД при неполных нагрузках. Компромисс: размер/масса и КПД (иллюстрация – на рис. 3).

триадам пентаграммы для электрической машины, предложено в табл. 3.

В частности, при работе с триадой (3) преследуется цель – показать, как взаимодействующие активные части (статор и ротор) могут в принципе охлаждаться, не фокусируясь только на одном или двух основных методах.

Триада (1) – особенная, поскольку отражает интеграцию электрической машины в систему электропривода. Луч этой триады содержит не-

сколько соответствующих узлов, необходимых для описания процесса создания требуемой формы движения посредством формирования напряжений и токов и передачи энергии на активные части машины.

Отметим, что триадам и лучам пентаграммы соответствуют следующие ключевые показатели качества:

1. Качество движения, динамика, точность;
2. Электромагнитная совместимость; 3. Вибрации;

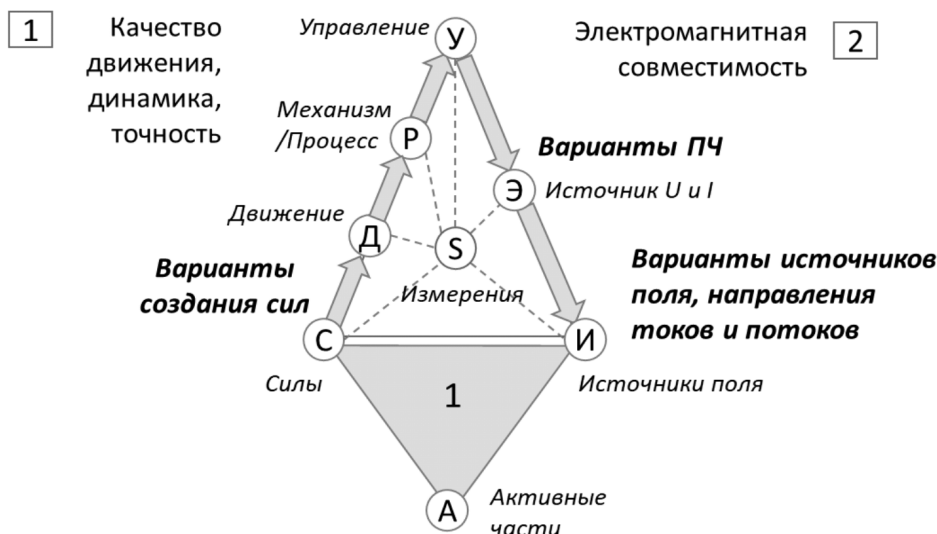


Рис. 4. Триада (1) и включение ЭМ в систему электропривода

- 4. Акустический шум; 5. Время службы машины;
- 6. Масса и размеры; 7. Стоимость; 8. Надежность;
- 9. Энергоэффективность.

Пентаграмма может использоваться не только для формирования у студента «полной картины знаний», но и для обучения проектированию машин. В хорошо спроектированной машине ее конструкция и параметры должны быть «сбалансированы» под конкретное применение. Например, высокий КПД не должен достигаться за счет неприемлемо высокого уровня акустических шумов. В контексте пентаграммы мы можем говорить о балансе ее лучей, оптимальном для данного применения.

Анализ подачи материала в [1–4] показывает, что для современных учебников характерна определенная очередность: сначала описываются трансформаторы, затем асинхронные машины, затем машины постоянного тока и т.д. В то же время, очевидно, что у различных классов и типов машин – много общего, и именно на элементах, процессах и эффектах, общих для разных типов машин, предлагается фокусировать внимание студентов, показывая различия, например, при обсуждении активных частей. Таким образом мы можем реализовать переход от «помашинного» способа передачи знаний к более эффективным формам.

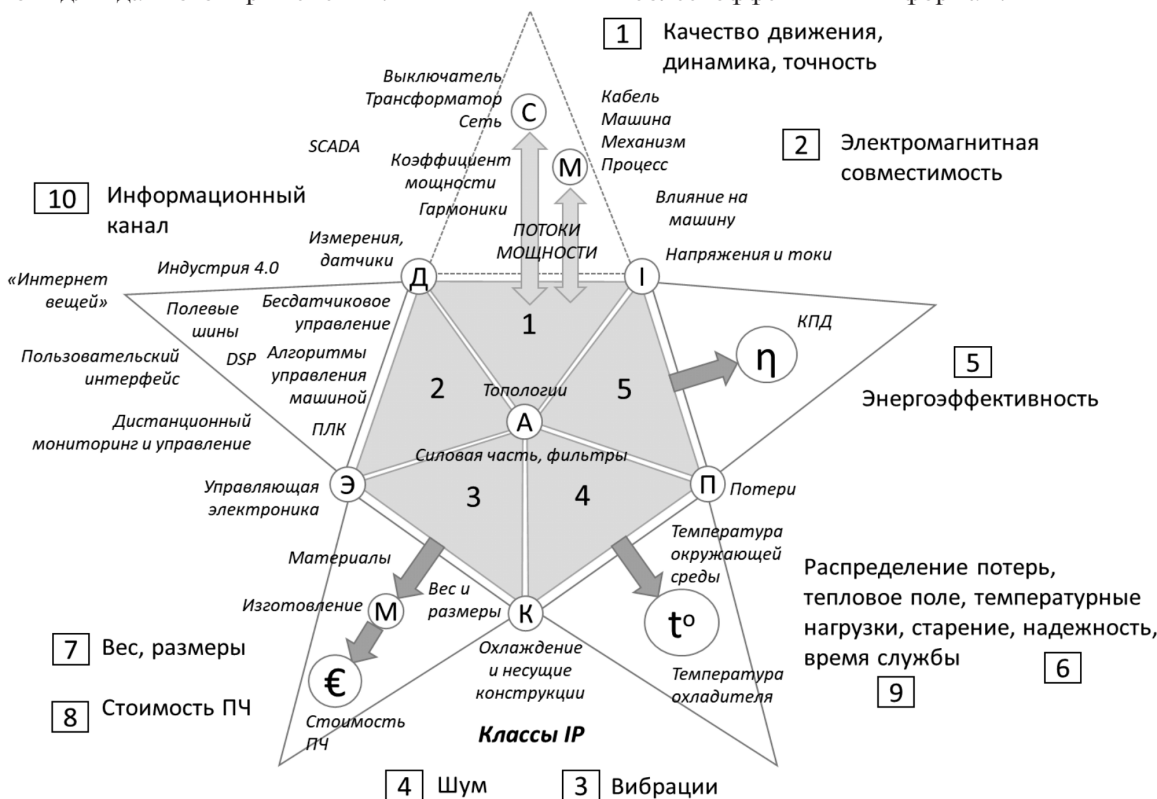


Рис. 5. Пентаграмма, адаптированная для изучения преобразователей частоты

Таблица 4

Основные узлы пентаграммы

Узлы	Основное содержание материала (пример)
(А) Силовая часть, фильтры, топологии	Разнообразие топологий ПЧ. Требования к фильтрам в зависимости от выбранной топологии. Топологии и формирование токов и напряжений, в том числе ШИМ. Влияние фильтров на форму токов и напряжений.
(И) Напряжения и токи	Принцип действия ПЧ различных типов.
(Д) Измерения, датчики	Необходимость в измерениях и соответствующих датчиках в зависимости от топологии ПЧ.
(Э) Управляющая электроника	Печатные платы. Компоновка. Интерфейсы с силовой частью.
(К) Охлаждение и несущие конструкции	Компоновка силовой части и фильтров в корпусе или электрошкафу. Методы охлаждения. IP-классы. Масса, габариты, структура стоимости. Вибрации и шумы. Распределение потерь. Тепловое поле, тепловые нагрузки. Старение, надежность, время службы.
(П) Потери	Потери в силовом канале ПЧ: в ключах, конденсаторах и пр. Потери в фильтрах. Методы расчета потерь. Потери и КПД при неполных нагрузках. Распределение потерь внутри ПЧ (электрошкафа).

Таблица 5

Содержание материала лекций и семинаров, соответствующих триадам

Триады	Темы и содержание лекций (пример)
(1) Силовая часть – измерения – напряжения и токи	Тема лекции «Силовой канал, ПЧ как часть системы электропривода». Активная и реактивная мощность. Электромагнитная совместимость. Высшие гармоники. Влияние ПЧ на электрическую машину. Влияние ПЧ на сеть. Интеграция с электрической машиной.
(2) Силовая часть – измерения – управляющая электроника	Тема лекции «Управление, информационный канал». Полевые шины. Человеко-машинный интерфейс. Управление движением. Бездатчиковое управление. Дистанционный мониторинг и управление. ПЛК (PLC). ЦОС (DSP). АСУ ТП, АСКУЭ. Индустрия 4.0. Интернет вещей.
(3) Силовая часть – несущие конструкции и охлаждение – управляющая электроника	Тема лекции «Вопросы эффективного производства и стоимости». Компоновка, сборка. Разработка под конкретные целевые функции или ограничения, такие как ограничение по стоимости создаваемого продукта, минимальная масса или необходимость вписаться в заданные габариты. Создание конструкции простой в обслуживании и ремонте. Создание конструкции, позволяющей максимально автоматизировать производство.
(4) Силовая часть – несущие конструкции и охлаждение – потери	Тема лекции «Потери, тепловые процессы и охлаждение». Тепловой расчет. Источники тепла и распределение теплового поля. Ограничение температуры в критических местах. Надежность, наработка на отказ. Тепловые расчеты. Компромиссы: инвестиции в громоздкую и сложную системы охлаждения или изначальный выбор топологии силовой части с низкими потерями, но более дорогой.
(5) Силовая часть – напряжения и токи – потери	Тема лекции «Энергоэффективность. КПД ПЧ и КПД системы». Влияние свойств силовых компонентов, в первую очередь ключей, на потери и КПД. Влияние формы токов на КПД. Оптимизация формы токов для снижения потерь. Компромиссы: использование дорогого и громоздкого фильтра для снижения потерь в кабеле и электрической машине за счет дополнительных потерь в этом фильтре.

Для того чтобы показать, что применение пентаграммы не ограничивается электрическими машинами и имеет потенциал применения для других электротехнических устройств, рассмотрим пентаграмму для преобразователей частоты (ПЧ) (рис. 5). Можно заметить, что часть пентаграммы на рис. 1 и 5 имеет ряд похожих триад – триады (3), (4) и в большей степени (5).

Основное содержание материала лекций и семинаров, соответствующее основным узлам пентаграммы для ПЧ, расположенных в центре пентаграммы и на пересечении ее линий, и триадам (1)–(5) предложено в табл. 4 и 5.

Интересно, что для различных узлов триад можно разработать соответствующие математические модели процессов. При изучении ПЧ особенно интересно рассмотрение комбинаций триад. Например, одновременное рассмотрение триад (1) и (2) позволяет проанализировать, каким образом управление влияет на силовой канал и потоки мощности. Рассмотрение триад (2) и (3) позволяет сфоку-

сироваться на ПЧ как на физическом объекте. При этом можно заметить, что в структуре затрат на создание ПЧ луч триады (2) будет представлять в большей степени затраты на НИОКР, а луч триады (3) – затраты на производство. Рассмотрение триад (4) и (5) дает возможность сформулировать задачу по поиску компромисса между КПД, эффективным охлаждением и компактностью.

Отметим, что, например, в классических монографиях по электроприводу [10] и силовой электронике [11] не рассматриваются экономические критерии разработки, стоимости конечного продукта, не затрагиваются вопросы компоновки элементов. Таким образом, проблема формирования у студента «полной картины знаний» стоит у изучающих преобразователи частоты в такой же степени, как у изучающих электрические машины.



Рис. 6. Пентаграмма, написанная одной линией

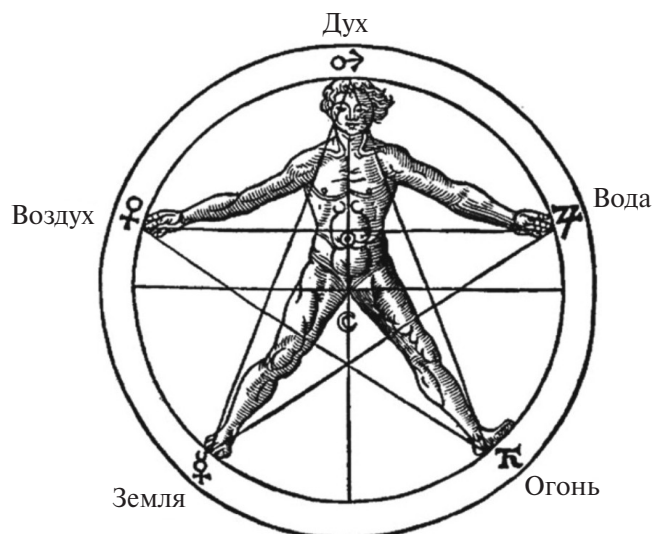


Рис. 7. Пентаграмма со стихиями и совершенным человеком

Пентаграмма как набор связанных логических блоков, описывающих совокупность физических процессов, эффектов, их связей между собой и, в чем-то даже философию построения электротехнических устройств, — новая идея, впервые выносимая на обсуждение в данной работе. Выше показано применение пентаграммы для электрических машин и преобразователей частоты, но, очевидно, можно попробовать применить пентаграмму и для других электротехнических устройств и, возможно, даже не электротехнических.

Пентаграмма может использоваться в учебном процессе, а также при проектировании электротехнических устройств. Процесс передачи знаний, организованный в соответствии с логическими блоками пентаграммы, становится более структурированным и понятным для изучающего предмет. Это может иметь особенный положительный эффект при ограничении времени для передачи знаний определенного объема, например только одним семестром. Пентаграмма может также стать своеобразным навигатором и «напоминателем» для проектировщика.

В современном мире цифровые технологии обучения начинают играть все большую роль. Веб-сайты заменяют бумажные книги, в том числе учебники. Современные веб-технологии позволяют учебному материалу на сайте быть не просто копией бумажного учебника благодаря различным интерактивным элементам, анимации, вставкам видео и т.п. Используя современные возможности веб-дизайна, можно сделать пентаграмму одновременно «обложкой» курса и навигатором по его содержанию (аналог списка названий глав в бумажном учебнике), поскольку есть возможность реализовать перемещение между частями курса щелчком мышки по различным узлам и триадам пентаграммы. Такой интерактивный веб-дизайн онлайн-курса может быть особенно привлекательным и удобным для современных студентов, выросших в век информационных технологий и интернета.

В заключение стоит заметить, что пентаграмма, написанная одной линией (рис. 6), — один из самых древних символов, который имел разные толкования в разные исторические периоды. Одно из

толкований — символ магического воздействия и господства дисциплинированной воли над явлениями мира — вполне применимо к сфере науки и образования, если его перефразировать как воздействие воли ученого на процессы в техносфере, в частности на процессы создания технических систем. Еще одно толкование пентаграммы — символ совершенного человека (рис. 7) — также переключается с целью процесса образования. Есть ли здесь какая-либо связь с учениями древних или это простое совпадение — может быть предметом увлекательной дискуссии между преподавателем и студентами и привести к новым вопросам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. М.: Энергия, 1980, 927 с.
2. **Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovovb V.** Design of rotating electrical machines. John Wiley & Sons, 2008, 612 p.
3. **Sadarangani C.** Electrical machines: design and analysis of induction and permanent magnet motors. School of Electrical Engineering, Royal Inst. of Technology, 2006, 665 p.
4. **Chapman S.** Electric machinery fundamentals. McGraw Hill, Fourth ed., 2005, 746 p.
5. **Miller T.J.E.** Switched reluctance motors and their control. Magna Physics, 1993, 200 p.
6. **Hendershot J.R., Miller T.J.E.** Design of brushless permanent-magnet motors. Magna Physics Pub., 1994, 822 p.
7. **Hanselmann D.C.** Brushless permanent-magnet motor design. First ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994, 392 p.
8. **Gieras J., Wing M.** Permanent magnet motor technology. Design and applications. Second ed. Marcel Dekker, Inc, 2002, 590 p.
9. **Delaere K., Tenhunen A., Heylen W., Hameyer K., Belmans R.** Predicting the stator vibration spectrum of induction machines under normal operation. Proceedings of the 1st European Conference on Launcher Technology: launch vehicle vibrations, 1999, pp. 700–709.
10. **Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф.** Общий курс электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1992, 544 с.
11. **Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P.** Power electronics: converters, applications, and design. John Wiley & Sons, 2003, 802 с.

[15.05.2019]

А в т о р: Матвеев Алексей Вячеславович окончил МЭИ в 1998 г., диссертацию защитил в Эйндховенском университете (Нидерланды) в 2006 г. Занимается развитием собственного проекта DriveConstructor.

Title Applying the Pentagram for Structuring the Process of Studying Electrical Devices

MATVEYEV Alexey V. (graduated the Moscow Power Engineering Institute in 1998. He obtained his PhD from Eindhoven University of Technology (the Netherlands) in 2006. Currently he is developing his own project DriveConstructor.

Faster emergence and introduction of the new technologies in the modern world requires changes in the field of engineering education. Large volumes of knowledge must be transferred in a shorter time. In this paper, an alternative view on structuring the process of studying electrical devices is presented, using electrical machines and frequency converters as the examples. It is proposed to use the set of logical blocks, graphically described by a pentagram – a well-known symbol and a geometric figure – for the organization and transfer of the knowledge. It is assumed that this method of knowledge transfer will be more efficient in terms of the time required. A pentagram is a set of related logical, locks that describes a set of physical processes, effects, their connections with each other and, probably, even the philosophy of building the electrical devices.

K e y w o r d s: *electric machines, frequency converters, electrical devices, studying, teaching, structure, logical blocks, pentagram*

REFERENCES

1. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** *Elektricheskiye mashiny* (Electric cars). Moscow, Energiya, 1980, 927 p.
2. **Pyrhunen J., Jokinen T., Hrabovov6 V.** Design of rotating electrical machines. John Wiley & Sons, 2008, 612 p.
3. **Sadarangani C.** Electrical machines: design and analysis of induction and permanent magnet motors. School of Electrical Engineering, Royal Inst. of Technology, 2006, 665 p.
4. **Chapman S.** Electric machinery fundamentals. McGraw Hill, Fourth ed., 2005, p. 746.
5. **Miller T.J.E.** Switched reluctance motors and their control. Magna Physics, 1993, 200 p.
6. **Hendershot J.R., Miller T.J.E.** Design of brushless permanent-magnet motors. Magna Physics Pub., 1994, 822 p.
7. **Hanselmann D.C.** Brushless permanent-magnet motor design. First ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994, 392 p.
8. **Gieras J., Wing M.** Permanent magnet motor technology. Design and applications. Second ed. Marcel Dekker, Inc, 2002, 590 p.
9. **Delaere K., Tenhunen A., Heylen W., Hameyer K., Belmans R.** Predicting the stator vibration spectrum of induction machines under normal operation. Proceedings of the 1st European Conference on Launcher Technology: launch vehicle vibrations, 1999, pp. 700–709.
10. **Il'inskiy N.F.** *Obshchiy kurs elektroprivoda* (General course of electric drive). Moscow, Energoatomizdat, 1992, 544 p.
11. **Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P.** Power electronics: converters, applications, and design. John Wiley & Sons, 2003, 802 p.

[15.05.2019]