

Математическая модель

мехатронного модуля охлаждения частотного преобразователя

В статье предлагается математическая модель энергосберегающего метода регулирования двухдвигательного вентиляционного электропривода на основе односекционного BLDC-электродвигателя с микропроцессорным управлением следящей системой воздушного охлаждения силового блока частотного преобразователя. Приведены структурные схемы электропривода, смоделированные на виртуальных моделях в среде MATLAB-Simulink.

Пулат Сагитов, д. т. н., профессор

aiPET@aiPET.kz

Дамир Гафурьянов

radan-electric@mail.ru

Рашид Гафурьянов

Эффективность работы частотного преобразователя для управления электрическими машинами, в частности, в переходных режимах, существенно зависит от качественных характеристик системы управления силовым интеллектуальным модулем преобразователя, в состав которой входит система охлаждения, обеспечивающая его защиту и увеличивающая срок эксплуатации.

Под эффективностью системы охлаждения понимают возможность достижения минимально возможной рабочей температуры охлаждаемого компонента (интеллектуального силового модуля, выходных каскадов системы управления и т. д.). Повышения эффективности на данный момент можно добиться несколькими способами:

- увеличением площади рассеяния радиатора или количества воздушных каналов;
- применением для радиаторов материалов с более высоким коэффициентом теплопроводности (медь вместо традиционно используемого алюминия и его сплавов);

- устранением микрозазоров между поверхностями охлаждаемого компонента и радиатором посредством применения теплопроводящей пасты;
- изменением направления потока воздуха на охлаждаемый элемент или от него;
- оптимизацией мехатроники системы активного воздушного охлаждения с использованием более производительного вентилятора и новой системы автоматизированного управления многодвигательным электроприводом на основе BLDC-электродвигателей (при воздушном охлаждении).

Также на эффективность системы охлаждения влияет разность температур между охлаждаемым компонентом и окружающим воздухом.

Примем к рассмотрению следующую функциональную схему мехатронной системы активного воздушного охлаждения (рис. 1). Основные функциональные требования к элементам мехатронной системы [1]:

- Уменьшение абсолютного значения температуры каждого тепловыделяющего логического и силового электронного элемента конструкции до пониженного уровня и поддержание его постоянным. Выполнение этого требования позволяет иметь высокие надежные показатели системы управления и обеспечить ее быстродействие.
- Обеспечение минимального перепада температур внутри каждого из тепловыделяющих элементов конструкции или участка «критической» тепловой цепи. Уменьшение перепада температур между температурой элемента и температурой «горячей точки» цепи элементов при пониженном уровне температур позволяет располагать повышенным запасом помехоустойчивости.
- Создание минимального теплового сопротивления между источниками теплоты (силового интеллектуального модуля и силовых транзисторов) и стоком теплоты (хладоносителем). Выполнение этого требования позволяет при сохранении температуры источников теплоты на допустимом

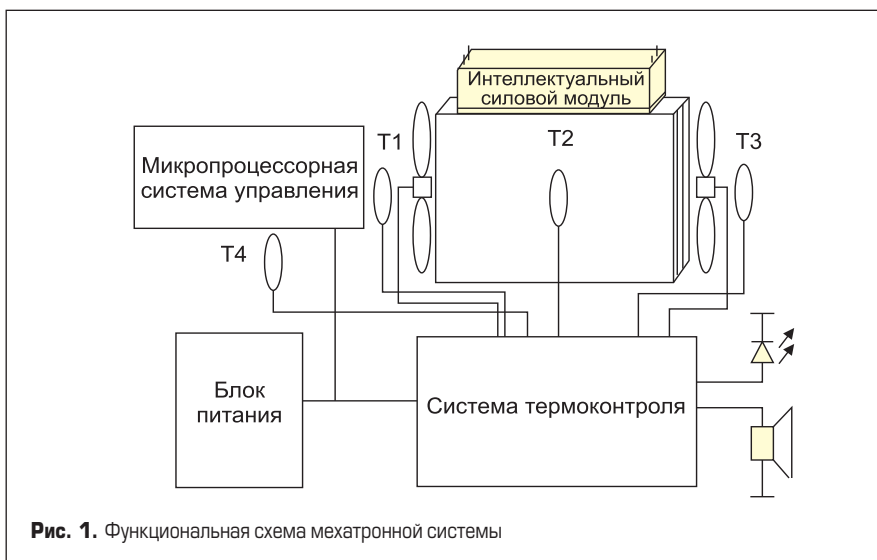


Рис. 1. Функциональная схема мехатронной системы

уровне повысить тепловые нагрузки и снизить массо-габаритные показатели системы управления.

- Распределение хладоносителя между элементами и узлами конструкции в количествах, соответствующих их тепловыделениям, и обеспечение необходимой скорости его распространения. Это устанавливает такие условия теплообмена между хладоносителем и элементами системы управления, которые позволяют поддерживать температуру каждого элемента на допустимом для него уровне при минимальном суммарном расходе хладоносителя. Если хладоноситель подается внутрь без должного распределения между тепловыделяющими элементами, то даже при достаточном суммарном расходе некоторые из них оказываются перегретыми до недопустимых температур, в то время

как другие, достаточно охлажденные, не могут использовать полностью поступающий к ним избыточный хладоноситель, который затем выводится из конструкции, не выполнив своих функций.

- Обеспечение таких влажностных функций для элементной базы, носителей информации и материалов системы управления, чтобы была возможность создать минимальные изменения в показателях надежности этих конструктивных элементов.
- Выбор элементов теплоотвода, средств и агрегатов системы охлаждения с такими показателями работоспособности $P(t)$ для всего времени эксплуатации преобразователя, чтобы выполнялось требование (вероятность работоспособности системы охлаждения выше вероятности работоспособности преобразователя):

$$P(t)_{Coxл} \geq P(t)_{П} \quad (1)$$

где: $P(t)_{Coxл}$ — вероятность работоспособности системы охлаждения; $P(t)_{П}$ — вероятность работоспособности преобразователя.

Системный подход к решению задачи охлаждения реализуется, когда одновременно и взаимосвязанно рассматриваются и синтезируются требуемые процессы охлаждения в конструкции силового блока, элементы и средства теплоотвода и их конструктивно-тепловые параметры, а также функциональные и надежностные параметры конструкции, обеспечение хладоносителем и его характеристики.

В основу расчета теплового режима силового блока положен метод электротепловой аналогии, обоснованный Г. Н. Дульневым для задач теплового режима РЭА.

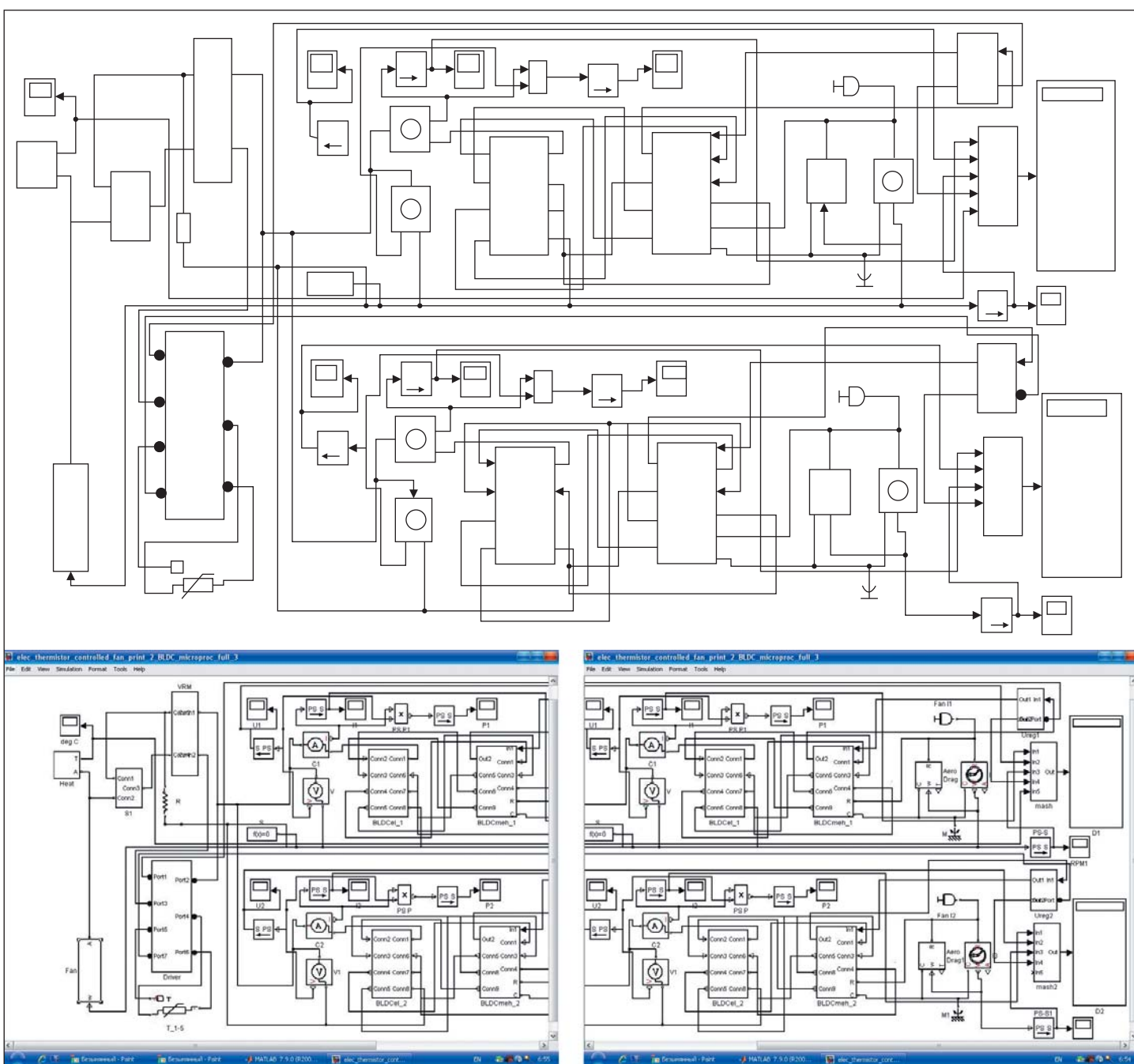


Рис. 2. Виртуальная модель мехатронного модуля системы воздушного охлаждения элемента силового блока преобразователя на примере двухдвигательного привода на BLDC-электродвигателях

Выводы

В обобщенном случае для расчета созданной тепловой схемы применим известный способ расчета нелинейных электронных схем. Здесь система уравнений в матричном виде, определяющая вектор-столбец температур $T = (T_1, T_2, T_3 \dots T_{n-1})^T$ в узлах схемы, по аналогии с узловыми потенциалами, будет иметь вид:

$$TY = -(AYA^T)^{-1}AP, \quad (2)$$

где: T_n — температура в n -м узле; n — число узлов в схеме; A — матрица узлов; A^T — матрица, транспонированная от A ; $P = (P_1, P_2 \dots P_m)^T$ — вектор-столбец тепловых потоков, проходящих через элементы схемы; Y — диагональная матрица тепловых проводимостей схемы.

Элементы матрицы Y , заданные температуры и тепловые потоки могут подчиняться тем или иным законам распределения с корреляционными связями между ними. Учитывая, что электромеханическая часть мехатронного модуля представляет собой привод на BLDC-электродвигателях, состав-

ляем уравнение этой части системы в пространстве состояний [2]:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (3)$$

где: \dot{x} — матрица входных значений; u — матрица выходных значений; A, B — матрицы, определяемые структурой силовой цепи BLDC-электродвигателя и значениями ее параметров.

Для решения системы уравнений (2) и (3) статического расчета искомых температур и тепловых потоков в пакете Simulink системы MATLAB 7 [3] была построена виртуальная модель мехатронного модуля активной системы воздушного охлаждения силового блока преобразователя с применением в качестве исполнительных элементов электромеханической части системы односекционных BLDC-электродвигателей (рис. 2). Рабочий ток и мощность на примере одного BLDC-электродвигателя представлены на рис. 3. Рабочая температура и скорость вращения на примере одного BLDC-электродвигателя показаны на рис. 4.

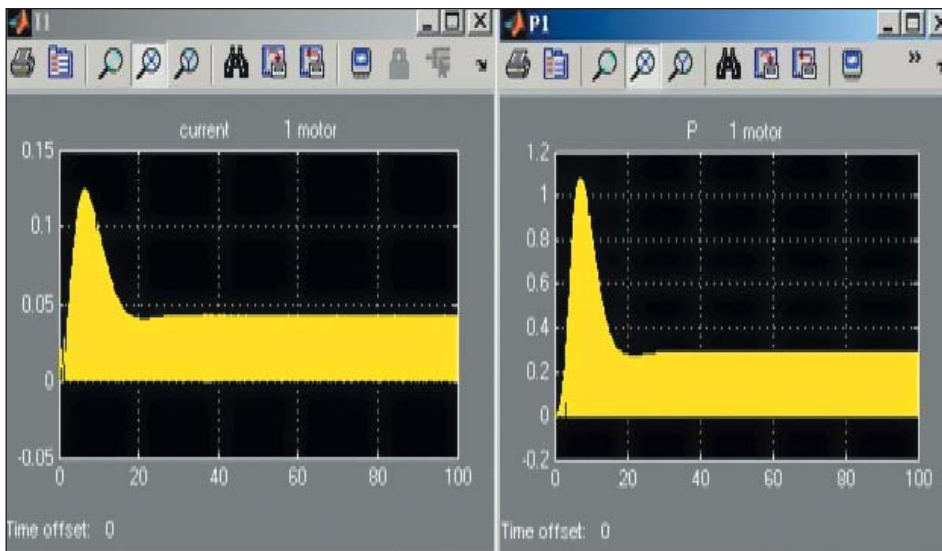


Рис. 3. Рабочий ток и мощность на примере одного BLDC-электродвигателя

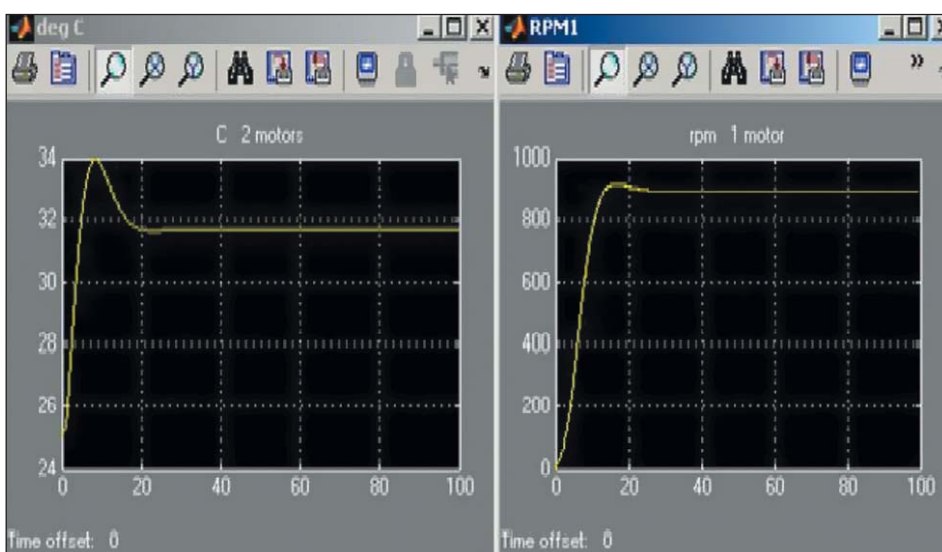


Рис. 4. Рабочая температура и скорость вращения на примере одного BLDC-электродвигателя

Результаты работы позволяют ускорить процесс проектирования и инсталляции современных силовых блоков в составе частотных преобразователей для управления электрическими машинами под требования конкретных силовых интеллектуальных модулей и электропривода системы охлаждения с оптимизацией энергосберегающих [4] характеристик.

Модель позволяет проверить правильность выбора различных по мощности электродвигателей в многодвигательной системе и, учитывая коэффициент загрузки объекта управления, предоставляет возможность добиться снижения потребляемой мощности АСУ охлаждением РЭА и расширения граничных режимов работы частотного преобразователя в целом.

Способность силового ключа выдерживать большое количество термоциклов до отказа является его важнейшей характеристикой для обеспечения безотказной работы в течение длительного времени. Результаты работы позволяют ускорить процесс проектирования и инсталляции современных силовых интеллектуальных модулей под производителя конкретного частотного преобразователя и электропривода системы охлаждения с оптимизацией энергосберегающих, шумо- и вибропонижающих характеристик. Разработка математической модели, учитывающей физические процессы, происходящие в силовых модулях при воздействии термомеханических стрессов, позволяет понять и описать механизм отказа, выработать рекомендации по улучшению конструкции модулей. С помощью модели, используя экстраполяцию, можно получить достаточно корректные результаты и за пределами этой области. Испытания с использованием коротких термоциклов позволяют определить стойкость к термоциклированию алюминиевых выводов и зоны металлизации кристаллов. Термоциклы длительностью 30–60 с в первую очередь приводят к разрушению паяного соединения DCB-подложки и медного основания силового модуля. Оптимизация мехатроники системы охлаждения позволит расширить границы использования ИРМ [5].

Литература

- Ильинский Н. Ф., Москаленко В. В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. Уч. пособие для студентов вузов. М.: Издательский центр «Академия». 2008.
- Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность). Курс лекций. СПб.: КОРОНА-Век. 2006.
- Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. Уч. пособие. СПб.: КОРОНА-Принт. 2001.
- Сагитов П. И. Энергосбережение в электроприводе. Уч. пособие. Алматы. 2003.
- www.ansoft.com
- www.radan-electric.kz
- www.delta.com