

**СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЯЕМОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
КРУПНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Е. В. Носач, В. В. Артамонов

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: evnosach@mail.ru

Ю. А. Бранспиз

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля
кв. Молодежный, 20-а, г. Луганск, 91034, Украина. E-mail: branspiz@mail.ru

Рассмотрены последствия работы с повышенными температурами в проводниках двигателей постоянного тока. Обоснована необходимость управлять системами вентиляции крупных электрических машин. В зависимости от режима работы электрической машины, а также с учетом влияния температуры активных частей на составляющие мощности, предложено несколько способов реализации системы управляемого охлаждения.

Ключевые слова: электрическая машина, потери, система охлаждения, изоляция, нагрузка.

**СТРУКТУРА СИСТЕМИ КЕРОВАНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ
ВЕЛИКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ**

Є. В. Носач, В. В. Артамонов

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: evnosach@mail.ru

Ю. А. Бранспіз

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
кв. Молодіжний, 20-а, м. Луганськ, 91034, Україна. E-mail: branspiz@mail.ru

Розглянуто наслідки роботи з підвищеними температурами провідників двигунів постійного струму. Обґрунтовано необхідність керувати системами вентиляції електричних машин. Залежно від режиму роботи електричної машини, а також з урахуванням впливу температури активних частин на складові потужності, запропоновано декілька способів реалізації системи керованого охолодження.

Ключові слова: електрична машина, втрати, система охолодження, ізоляція, навантаження.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Срок службы электрической машины зависит от нагрузки отдельных частей. Та часть машины, которая испытывает наибольшую удельную нагрузку, выйдет из строя раньше других, и таким образом ее реальный срок службы определяет срок службы всей машины [1, 2]. Опыт эксплуатации показал, что обычно электрические машины выходят из строя, в первую очередь, из-за износа или повреждения изоляции, обусловленных тепловыми процессами, возникающими в активных частях машины. Увеличение срока службы изоляции и, как следствие, повышение надежности электрических машин (ЭМ) обеспечивается применением систем охлаждения для отвода тепла от частей машины.

Цель работы заключается в создании системы управления вентиляционными режимами крупной машины постоянного тока в соответствии с электромеханическими нагрузками и особенностями системы охлаждения как сложного динамического теплоэнергетического объекта.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Материал исследования системы охлаждения ЭМ систем привода, как правило, представляется простейшими моделями с постоянными нагревания, не зависящими от режима работы двигателя или меняющимся от скорости вращения якоря. Это объясняется, чаще всего, стремлением создать простейшие методики расчета мощности двигателей при их выборе, проверочные расчеты при анализе особенностей эксплуатации электрических машин по причине их высокой аварийности и т.д. Анализ показы-

вает, что упомянутая аварийность является в большинстве случаев недостатком, вызванным особенностями эксплуатации, формирования защит и др., который присущ методологическим подходам при проектировании электромеханических систем.

Долговечность электродвигателя ограничена аварийными отключениями из-за выхода из строя (пробоя) изоляционных материалов или нагружения механической части, чаще всего подшипников. В этих двух направлениях сосредоточены усилия исследователей, конструкторов с целью повысить ресурс работоспособности электрических машин путем улучшения качества электроизоляционных материалов, совершенствования эксплуатационных характеристик, а также улучшения состояния и режимов контроля механических частей машин.

Важен резерв повышения работоспособности в совершенствовании систем охлаждения машин. В работе этот вопрос ставится несколько по-иному ввиду того, что создание систем управления режимами теплоотвода от частей работающих машин является мощным рычагом повышения надежности электромеханического оборудования.

Необходимость управлять системами вентиляции ЭМ обеспечит решение следующих, достаточно очевидных, задач:

- повышение надежности электрических машин за счет стабилизации температуры изоляции путем исключения экстремальных температурных перепадов;
- исключение излишнего потока охлаждающего воздуха в менее напряженных тепловых режимах,

чем тот экстремальный, исходя из которого производится расчет режима вентиляции.

Таким образом, можно сформулировать ряд положений, касающихся стратегии построения системы управляемого охлаждения:

- в системе охлаждения должна быть включена модель теплообменных процессов между активными токоведущими частями и элементами конструкции;

- положительные результаты при создании в систему охлаждения идентификационных моделей для определения текущего тепловыделения и температуры токоведущих частей. При этом управление вентиляционными режимами осуществляется не по косвенным параметрам (косвенное измерение температуры), а по фактическим значениям параметров, характеризующим нагрев;

- управление вентиляционными режимами целесообразно осуществлять с использованием вентиляторов с регулируемым электроприводом. При этом следует учитывать, что достигаемый эффект отражается по таким статьям:

- 1) снижение экстремальных и текущих значений температуры неизбежно приводит к повышению ресурса работоспособности электрических машин, т.е. снижаются расходы на ремонт и т.п.;

- 2) снижение температурных параметров силовых частей электрической машины снижает активное сопротивление обмоток, т.е. потери мощности на активных сопротивлениях обмоток.

Предложено проанализировать электрические машины с принудительной вентиляцией, в частности, машины с принудительной воздушной вентиляцией. При анализе вопроса в качестве аксиоматических положений примем следующие посылки:

- при переменной нагрузке в системе привода система охлаждения приводной машиной некоторым образом должна соответствовать режиму нагрузки. Иными словами, система охлаждения должна быть регулируемой в соответствии с параметрами нагрузочного режима, а также с характеристиками охлаждающей среды;

- электрическая машина представляет собой сложный теплоэнергетический объект, включающий, с одной стороны, элементы, которые являются источниками тепловыделения, с другой – элементы теплоотвода, с помощью которых осуществляется удаление из активных частей тепла (сталь и конструкционные элементы ЭМ, воздушные каналы и др.);

- постоянная нагревания проводников силового контура, как правило, на порядки ниже соответствующих величин эквивалентной постоянной всей электрической машины. Это приводит к интенсивному нагреванию проводников обмоток и изоляции.

Нагрузочная способность электрической машины в большинстве случаев определяется условиями нагревания, т.к. повышение температуры является главной причиной, ограничивающей мощности машины при длительных и кратковременных нагрузках. С увеличением нагрузки возрастают потери энергии в машине, повышается количество выделенной теплоты и при чрезмерной нагрузке тем-

пература отдельных ее частей может превысить допустимые пределы.

С учетом сказанного, можно сделать вывод о том, что при переменной нагрузке перегрев изоляции практически неизбежен даже в тех режимах, когда средние значения температуры активных частей существенно меньше расчетной.

На рис. 1 представлена схема, реализующая “греющую” часть двигателя за счет потерь в меди, равные

$$\Delta P_R = I^2 R_0 (1 + \alpha \Theta), \quad (1)$$

и потерь в стали, зависящих от индукции в магнитопроводе и скорости его перемагничивания:

$$\Delta P_C = K_c (fB)^2, \quad (2)$$

где R_0 – сопротивление якоря в холодном состоянии; α – температурный коэффициент сопротивления; Θ – температура медного проводника, обтекаемого током нагрузки.

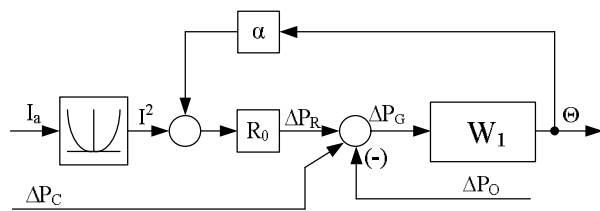


Рисунок 1 – Структурная схема “греющей” части двигателя

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

ΔP_0 – потери мощности, выводимые из машины за счет механизма теплоотвода; ΔP_G – греющие потери, определяемые равенством

$$\Delta P_G = \Delta P_R + \Delta P_C. \quad (3)$$

Баланс потерь в машине определяется зависимостью:

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_R + \Delta P_C - \Delta P_0. \quad (4)$$

В приведенной схеме цепь, реализующая увеличение сопротивления R_0 при нагревании, представляет собой положительную обратную связь, игнорирование которой недопустимо, хотя повсеместно при расчетах принимается сопротивление неизменным. Температурный коэффициент сопротивления для меди принимается $\alpha = 0,004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Ток в нагрузке можно считать не зависящим от сопротивления вследствие того, что он определяется исключительно моментом на валу. Температура проводника, в свою очередь, зависит от потерь:

$$\Delta P_P = mI^2 R(\Theta). \quad (5)$$

С учетом того, что при неизменных условиях теплоотвода температура пропорциональна греющим потерям, то

$$\Theta_G = \beta \Delta P_P = \beta mI^2 R(\Theta). \quad (6)$$

С учетом последней зависимости,

$$R(\Theta) = R_0 (1 + \alpha \beta mI^2 R(\Theta)),$$

откуда получим зависимость $R(\Theta)$:

$$R(\Theta) = \frac{R_0}{1 - R_0 \alpha \beta m l^2}, \quad (7)$$

где β , m – постоянные коэффициенты.

Здесь нами не рассматривается особенность построения системы охлаждения, которая учитывает величину и изменение потерь в стали, т.к. этот вопрос представляет собой отдельную задачу и это не затрагивает принципиальную сторону вопроса.

Изменение потерь ΔP_O , по существу, является задачей управления потерями или, что является более точным, управления температурой отдельных частей электрической машины.

Из сказанного видно, что k_1 – коэффициент, связывающий температуру меди с потерями в ней, а T_1 – постоянная времени нагревания меди с учетом ее теплоемкости. Этот вопрос рассматривается детально в [3].

Развитием схемы, представленной на рис. 1, является схема (рис. 2), включающая звенья:

$W_1 = \frac{k_1}{T_1 p + 1}$, $W_2 = \frac{k_2}{T_2 p + 1}$ и $W_3 = \frac{k_3}{T_3 p + 1}$, определяющие процесс нагревания стали в пазах машины за счет потерь в меди, а также процесс нагревания других частей машины, в частности, внешних слоев магнитной системы. В звеньях k_1 , k_2 , k_3 – коэффициенты передачи; T_1 , T_2 , T_3 – постоянные времени контуров “медь–сталь” в примыкающих частях, а

также “сталь в пазу–корпус”. Эти параметры в основном зависят от конструктивных размеров машины и определяются опытным или расчетным путем. На схеме W_{Oe} – передаточная функция системы теплоотвода при естественной вентиляции, когда тепло выносится из машины по охлаждающим трактам без применения каких-либо устройств либо с помощью управляющих элементов. Ввиду малого значения параметров данной передаточной функции, допустим, что $W_{Oe} = 1$.

При реализации принудительной системы охлаждения основными параметрами являются показания датчиков температуры, которые могут устанавливаться в различных частях ЭМ: на проводниках (температура меди), стали, корпусе и т.п. В схеме передаточные функции систем охлаждения представлены блоками W_{O1} и W_{O2} , входными параметрами для которых является температура определенных частей двигателя и некое задающее воздействие.

Из схемы рис. 2 видно, что для реализации принудительной вентиляции должна быть замерена температура Θ_1 или Θ_2 , т.е. температура в местах, непосредственно примыкающих к проводнику (Θ_1) или в отдаленной части магнитопровода (Θ_2). Применительно к машинам постоянного тока это означает передачу информации о температуре в пазах с вращающегося якоря или контроль температуры воздуха, охлаждающего проводники в пазу.

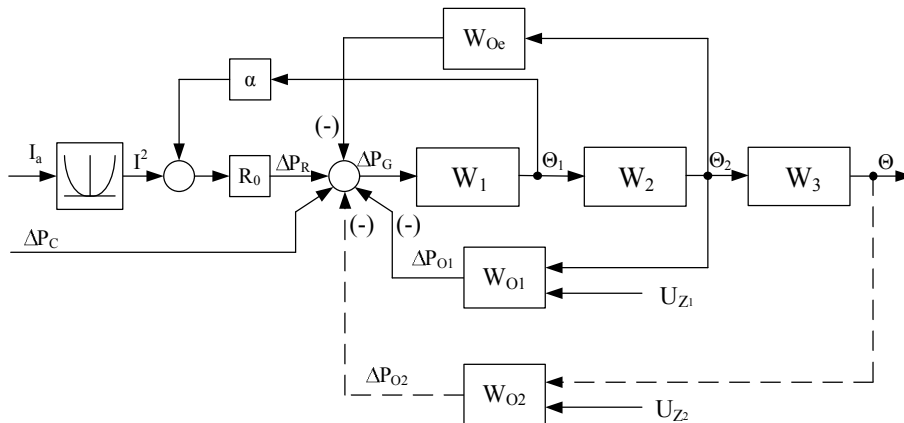


Рисунок 2 – Структурная схема системы охлаждения двигателя

В зависимости от вида применяемой вентиляции будет изменяться передаточная функция системы. Полученные таким образом передаточные функции будут соответствовать некоторой схеме теплоотвода, где количество тепловой мощности, отводимой в пространство, зависит от температуры активных частей и количества охлаждающего воздуха, продуваемого через вентиляционные каналы охлаждаемой системы.

Введение звена принудительной вентиляции при соответствующем выборе параметров приводит к существенному уменьшению максимума температуры проводника и изоляции при единичном скачке возмущающего воздействия – тока I силовой цепи.

Приведенная схема позволяет уяснить положение: даже наличие замкнутой системы управления охлаждением с входом, зависящим от температуры

меди, не позволяет исключить существенный перегрев меди в переходных режимах, и причиной тому является исключительно большая разница между постоянными нагревания меди T_1 и постоянной системы охлаждения; для исключения возможных перегревов необходима значительная форсировка режима вентиляции, что естественно сказывается прежде всего на технических возможностях системы охлаждения.

Система охлаждения фактически не имеет физической обратной связи, т.к. она является разомкнутой, и количество воздуха, проходящего по активным зонам машины, по существу является не зависящим от температуры в зоне теплообмена. Фактическое “замыкание” уясним по простейшей тепловой модели, представленной на рис. 3.

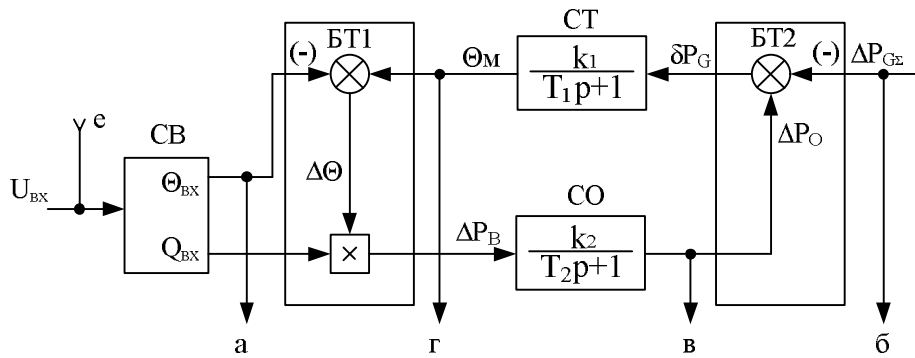


Рисунок 3 – Структура теплообменных процессов в разомкнутой системе

На схеме (рис. 3) СВ – система вентиляции; СТ – система тепловыделения; СО – система теплоотвода.

Блоки БТ1 и БТ2, по существу, определяют тепловыделение и теплообмен в машине; на выходе БТ1 имеем потери мощности, выносимые из машины системой вентиляции; блок БТ2 определяет разность потерь мощности греющих ΔP_{Gz} и выносимых из машины ΔP_O . Из приведенной схемы очевидны возможные варианты построения систем управляемого охлаждения, получаемые в зависимости от того, в какой точке и какая информация берется в качестве приоритетной. Обработанная соответствующим образом информация должна поступать на вход системы вентиляции СВ (вход “е”).

Первый вариант устройства управления вентиляционным режимом. С выхода системы вентиляции поступает охлаждающий воздух с входной температурой Θ_{ex} , а также поток воздуха Q_{ex} . Так реализуется разомкнутая система, обеспечивающая подачу дополнительного воздуха в канал охлаждения. Предпочтительно иметь возможность регулирования производительности устройства охлаждения в зависимости от температуры охлаждающей среды, а также с учетом изменений температуры активных частей двигателя, таким образом можно добиться постоянства или заданного изменения температуры активных частей Θ_M . Информационный сигнал при этом берется в точке “а” – путем измерения температуры охлаждающего воздуха.

Вариант второй. Информационным входом является сигнал, пропорциональный греющим потерям в активных элементах системы (точка “б”). Одна из модификаций второго варианта системы – устройства без корректирующей поправки на температуру охлаждающей среды, а вторая – с введением корректирующей поправки на отклонение фактической температуры окружающей среды от заданного значения ее контрольного уровня.

Третий вариант. Система строится с обратной связью, формируемой уровнем мощности тепловых потерь, отводимых системой вентиляции ΔP_O (точка “в”). Система сложнее предыдущих по причине сложности получения достоверного сигнала ΔP_O .

Преимущество, однако, может компенсировать сложность в связи с тем, что в системе достаточно просто можно организовать канал сравнения греющих потерь ΔP_{Gz} и потерь ΔP_O . Такая система наиболее полно может учитывать особенности как нагревания машины, так и ее охлаждения, учитывая влияние охлаждающей системы.

Четвертый вариант системы. В качестве информационного параметра принимается сигнал, пропорциональный температуре меди силового контура (точка “г”). На первый взгляд, система сложна ввиду необходимости установки датчиков непосредственно в конструкцию электрической машины. Формально это так, но следует учитывать то, что в настоящее время имеется возможность точного определения температуры по косвенным параметрам – одним из наиболее современных методов.

ВЫВОДЫ. 1. Показана важность учета основных параметров, влияющих на надежность машины, энергетическо-экономический эффект и т.д., а именно: учет зависимости сопротивления обмоток и изоляции от температуры проводников, значений потерь мощности, а также режима нагрузки двигателя.

2. Рассмотрены основные моменты, касающиеся процессов нагревания и охлаждения активных частей крупных ЭМ.

3. Предложено несколько вариантов реализации системы охлаждения в зависимости от режима работы двигателя, возможности изменения структуры самой системы охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хвостов В.С. Электрические машины: Машины постоянного тока. – М.: Высш. шк., 1988. – 336 с.
2. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

THE STRUCTURE OF CONTROLLED COOLING OF LARGE ELECTRIC MOTORS

E. Nosach, V. Artamonov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: evnosach@mail.ru

Yu. Branspiz

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
kvartal Molodizhnyi, 20-a, Luhansk, 91034, Ukraine. E-mail: branspiz@mail.ru

Considered consequences of the work with higher temperature in the conductors of DC motors. Grounded the need to control ventilation of electrical machines. Depending on the mode of operation of electrical machines, and considering effect of temperature on the active parts of the components of power, suggested several ways to implement the cooling system.

Key words: electrical machine, loss, cooling system, isolation, load.

REFERENCES

1. Hvostov V.S. *Electrical machinery: DC machine*. – M.: Vyssha shkola, 1988. – 336 p. [in Russian]
2. Ermolin N.P., Gerihin I.P. *The reliability of electrical machines*. – L.: Energiya, 1976. – 248 p. [in Russian]
3. Syromyatnikov I.A. *Modes of asynchronous and synchronous motors*. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 240 p. [in Russian]

Стаття надійшла 23.01.2012.
Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Родькіним Д.Й.

УДК 621.65.052

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАВИТАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ
В НАСОСНОМ КОМПЛЕКСЕ

А. А. Сердюк, Т. В. Коренькова, В. В. Артамонов

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: serduk@link.pl.ua

Ю. А. Бранспиз

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля
кв. Молодежный, 20-а, г. Луганск, 91034, Украина. E-mail: branspiz@mail.ru

Рассмотрены составляющие технико-экономической эффективности внедрения системы автоматического управления кавитационными процессами в насосном комплексе. Определены капитальные затраты на систему автоматического управления кавитационными процессами в насосном комплексе, рассчитаны экономический эффект и срок окупаемости системы.

Ключевые слова: кавитационные процессы, насосный комплекс, система автоматического управления, технико-экономическая эффективность.

ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КАВІТАЦІЙНИМИ ПРОЦЕСАМИ
В НАСОСНОМУ КОМПЛЕКСІ

О. О. Сердюк, Т. В. Коренькова, В. В. Артамонов

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: serduk@link.pl.ua

Ю. А. Бранспіз

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
кв. Молодіжний, 20-а, м. Луганськ, 91034, Україна, E-mail: branspiz@mail.ru

Розглянуто складові техніко-економічної ефективності впровадження системи автоматичного керування кавітаційними процесами в насосному комплексі. Визначено капітальні витрати на систему автоматичного керування кавітаційними процесами в насосному комплексі, розраховано економічний ефект та термін окупності системи.

Ключові слова: кавітаційні процеси, насосний комплекс, система автоматичного управління, техніко-економічна ефективність.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Функционирование насосных комплексов (НК) водо- и теплоснабжения сопровождается наличием кавитационных процессов, характеризующихся периодическим нарастанием и схлопыванием пузырьков, заполненных паром

или газом [1–3]. Условиями развития кавитации являются изменение температуры окружающей среды или жидкости, степени аэрации потока жидкости, режима работы потребителя и т. д. [1]. Явление кавитации наблюдается в сифонных трубопроводах,