

УДК

А.М. Афанасов, ДНУЖТ (Украина)

ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Характер управления параметрами взаимного нагружения тяговых электрических машин при их приёмо-сдаточных (послеремонтных) испытаниях во многом определяет как качество самих испытаний, так и общие экономические затраты на их проведение. Существует ряд вариантов систем взаимной нагрузки электромашин, применение которых в ручном режиме регулирования крайне затруднено из-за проблемы с их электромеханической устойчивостью. Вопросы, связанные с принципами автоматического регулирования режимами испытаний тяговых электромашин по методу взаимной нагрузки, требуют отдельного рассмотрения.

В соответствии с ГОСТ 2582-81 система автоматического управления стендом взаимного нагружения тяговых электрических машин должна обеспечивать [1]:

- стабилизацию напряжения на электромашине, работающей двигателем;
- стабилизацию тока электрической машины, работающей двигателем;
- стабилизацию частоты вращения валов;
- защиту от перегрузок по всем трём управляемым параметрам.

Жесткость данных требований для различных режимов испытаний ТЭД самим ГОСТ 2582-81 не оговаривается и является предметом отдельного исследования.

Все три параметра, стабилизация которых требуется в различных режимах испытания тяговых электромашин, связаны между собой известными уравнениями:

$$U_{д} = c\Phi_{д}\omega_{д} + I_{д} \cdot R_{д}; \quad (1)$$

$$U_{\Gamma} = c\Phi_{\Gamma}\omega_{\Gamma} - I_{\Gamma} \cdot R_{\Gamma}, \quad (2)$$

где $U_{\text{д}}$, U_{Γ} – напряжения на испытуемых двигателе и генераторе;

$\Phi_{\text{д}}$, Φ_{Γ} – магнитные потоки двигателя и генератора;

$\omega_{\text{д}}$, ω_{Γ} – скорости вращения якорей двигателя и генератора;

$I_{\text{д}}$, I_{Γ} – токи якорей двигателя и генератора;

$R_{\text{д}}$, R_{Γ} – активные сопротивления обмоток двигателя и генератора;

c – конструктивная постоянная электромашин.

Необходимо отметить, что система взаимного нагружения представляет собой объект регулирования с внутренними связями, объединяющими все параметры, входящие в (1) и (2).

Для выполнения программы испытаний тяговых электромашин необходимо обеспечение условий протекания токов якорей, вращения валов, а также наличия определённого напряжения на коллекторах [2]. Учитывая то, что три регулируемых параметра каждой из испытуемых электромашин в стационарном режиме взаимного нагружения жёстко связаны между собой, система управления стендом должна быть двухконтурной. Первый контур должен обеспечивать стабилизацию тока якоря испытуемого двигателя. Второй контур должен обеспечивать стабилизацию либо напряжения на испытуемом двигателе, либо частоты вращения его вала. При проведении испытаний на нагревание не имеет принципиального значения, какой из данных параметров будет стабилизирован.

Проверку частоты вращения ГОСТ 2582-81 требует проводить при номинальных значениях напряжения и тока испытуемого двигателя. Как будет показано ниже, обеспечение постоянства нужного значения напряжения на тяговом двигателе для проведения данной проверки в системах со стабилизацией угловой скорости не представляет никакой трудности.

Объектом регулирования в системах управления стендами взаимного нагружения любого варианта технической реализации являются испытываемые электромашины, объединенные в общую электромеханическую систему.

Управляемым параметром в контуре стабилизации тока является сила тока в обмотке якоря испытываемого двигателя.

Управляемым параметром в контуре стабилизации напряжения или угловой скорости является напряжение на испытываемом двигателе либо скорость (частота) вращения его якоря.

В системах с параллельным включением источника электрической мощности (источник напряжения) целесообразным является стабилизация напряжения с ограничением тока в параллельной ветви (подчиненное регулирование).

В остальных вариантах систем взаимного нагружения наиболее рациональным является стабилизация угловой скорости вращения якоря двигателя. Это связано с тем, что механическая часть системы взаимного нагружения является более инерционной, чем электрическая часть, а напряжение на испытываемых электромашинах в таких системах является параметром, определяемым частотой вращения якорей. При стабилизации угловой скорости колебательные процессы в системе автоматического регулирования будут менее вероятны, чем при стабилизации напряжения.

Рассмотрим общие принципы управления системами взаимного нагружения с различными способами компенсации потерь мощности.

В качестве систем автоматического управления будем рассматривать астатические замкнутые системы с отрицательной обратной связью, реализующие принцип регулирования по отклонению.

1. Прямой способ компенсации электрических потерь. Данный способ реализуется за счет включения в последовательный электрический контур испытываемых электромашин внешнего источника электрической мощности (источник напряжения) [2].

Функциональная схема контура стабилизации тока приведена на рис. 1. Контур включает в себя задатчик тока ЗТ, звено сравнения ЗС, управляющий элемент УЭ, источник напряжения ИН, электрический контур испытуемых электромашин ЭМ и датчик тока ДТ.

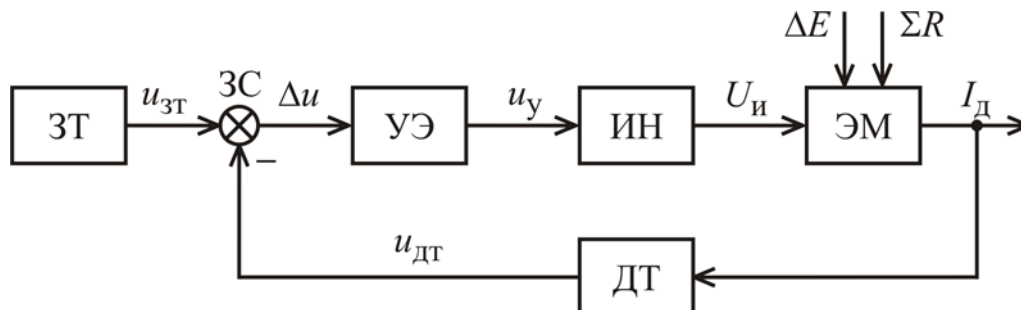


Рис. 1. Функциональная схема контура стабилизации тока

Управляющей координатой в данной системе является напряжение на задатчике тока $u_{зт}$, а управляемой координатой – ток якоря испытуемого двигателя I_d . Напряжение управления u_y определяет величину напряжения источника U_n и, в свою очередь, связано с напряжением рассогласования Δu принятым законом регулирования.

$$\Delta u = u_{зт} - u_{дт}. \quad (3)$$

Внешними воздействиями для данного контура регулирования является приведенная небалансная э.д.с. якорей испытуемых генератора и двигателя ΔE и суммарное сопротивление обмоток электромашин ΣR .

Значение ΣR растёт плавно с течением времени тепловых испытаний и может считаться практически постоянной при проверках частоты вращения и коммутации. Небалансная э.д.с. ΔE – величина, имеющая характер варьирования, сильно зависящий от варианта схемы взаимного нагружения, в том числе – от принятого способа компенсации потерь холостого хода.

2. Прямой способ компенсации потерь холостого хода. Данный способ реализуется путем использования внешнего источника механической мощности (дополнительного двигателя), соединенного с валами испытуемых электромашин [2].

Функциональная схема контура стабилизации угловой скорости вращения приведена на рис. 2. Контур включает в себя задатчик угловой скорости ЗУС, звено сравнения ЗС, управляющий элемент УЭ, источник момента ИМ (дополнительный двигатель), роторы испытуемых электромашин ММ (механическая часть машин) и датчик угловой скорости ДУС.

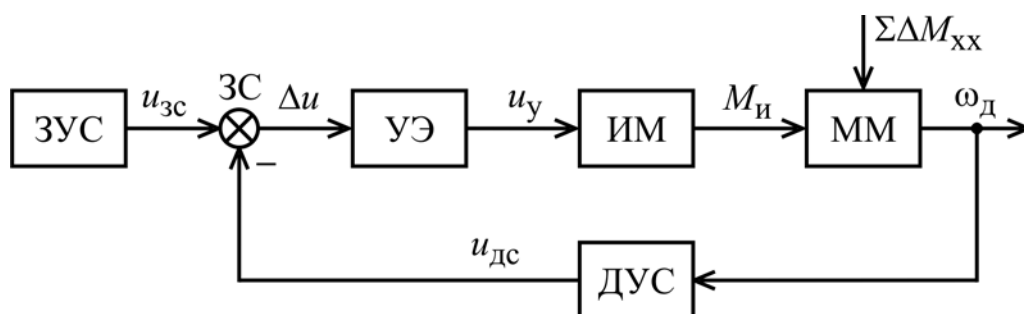


Рис. 2. Функциональная схема контура стабилизации угловой скорости

Управляющей координатой в данной системе является напряжение задатчика скорости $u_{зс}$, а управляемой координатой – угловая скорость вращения вала двигателя $\omega_д$. Напряжение управления $u_у$ определяет величину механического момента $M_и$, развиваемого источником момента ИМ и, в свою очередь, связано с напряжением рассогласования Δu принятым законом регулирования.

$$\Delta u = u_{зс} - u_{дс}. \quad (4)$$

Внешним воздействием для данного контура регулирования является момент сопротивления $\Delta M_{хх}$, приведенный к валу двигателя и обусловленный потерями холостого хода.

3. Косвенные способы компенсации электрических потерь. Такие способы заключаются в создании небалансной положительной э.д.с. в электрическом контуре последовательно включенных обмоток испытуемых электромашин [3].

Электрические потери компенсируются либо источником механической мощности, либо параллельно включенным источником

электрической мощности. При этом добавочная мощность дополнительного источника преобразуется из механической в электрическую в испытуемом генераторе. В случае использования параллельного источника напряжения его добавочная электрическая мощность предварительно преобразовывается в механическую испытуемым двигателем.

Универсальная функциональная схема контура стабилизации тока для систем с косвенным способом компенсации электрических потерь приведена на рис. 3. Контур включает в себя задатчик тока ЗТ, звено сравнения ЗС, управляющий элемент УЭ, регулятор небалансной э.д.с. РНЭ, электрический контур испытуемых электромашин ЭМ и датчик тока ДТ.

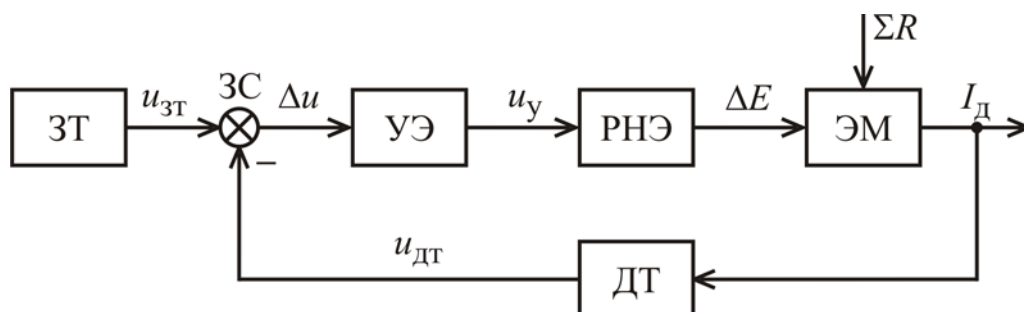


Рис. 3. Универсальная функциональная схема контура стабилизации тока

Управляющей координатой является напряжение на задатчике тока $u_{ЗТ}$, а управляемой координатой – ток якоря испытуемого двигателя $I_{Д}$.

Напряжение рассогласования Δu определяется выражением (3) и связано с управляющим воздействием $u_{у}$ принятым законом регулирования.

Внешним воздействием для данного контура регулирования является суммарное сопротивление обмоток испытуемых электромашин ΣR .

В качестве регулятора небалансной э.д.с. РНЭ в зависимости от варианта схемы взаимного нагружения используется: регулятор поля, механический вариатор, конвертор напряжения (тока), источник угловой скорости [3]. Путем изменения напряжения $u_{у}$ система автоматического управления регулирует: разницу магнитных потоков испытуемых электромашин, передаточное число вариатора, коэффициент передачи по

напряжению (току) конвертора, величину добавки угловой скорости источника.

4. Косвенные способы компенсации потерь холостого хода. Такие способы заключаются в создании положительного небалансного электромагнитного момента испытуемого двигателя. Сами потери холостого хода компенсируются либо источником напряжения, включенным последовательно, либо источником угловой скорости. При этом добавочная мощность дополнительного источника преобразуется из электрической в механическую в испытуемом двигателе. В случае использования источника угловой скорости его добавочная механическая мощность предварительно преобразуется в электрическую в испытуемом генераторе.

Универсальная функциональная схема контура стабилизации угловой скорости для систем с косвенным способом компенсации потерь холостого хода приведена на рис. 4.

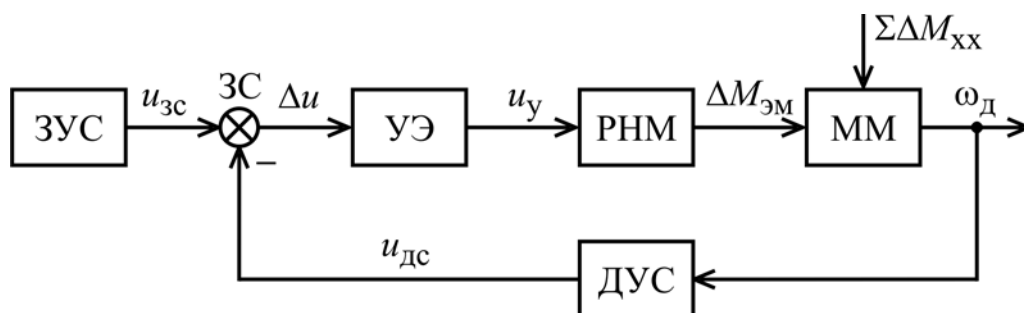


Рис. 4. Универсальная функциональная схема контура стабилизации угловой скорости

Контур включает в себя задатчик угловой скорости ЗУС, звено сравнения ЗС, управляющий элемент УЭ, регулятор небалансного электромагнитного момента РНМ, роторы испытуемых электромашин ММ и датчик угловой скорости ДУС.

Управляющей координатой является напряжение задатчика угловой скорости $u_{зс}$, а управляемой координатой – угловая скорость вала испытуемого двигателя $\omega_д$.

Напряжение рассогласования Δu определяется выражением (4) и связано с напряжением управления u_y принятым законом регулирования.

Внешним воздействием для данного контура регулирования является момент сопротивления ΔM_{xx} .

В качестве регулятора небалансного электромагнитного момента в зависимости от варианта схемы взаимного нагружения используется: регулятор поля, механический вариатор, конвертор напряжения (тока), параллельный источник напряжения.

Изменением напряжения u_y в системе автоматического управления регулируется разница магнитных потоков испытуемых электромашин, передаточное число вариатора, коэффициент передачи конвертора напряжения (тока), напряжение параллельно включенного источника.

Вариант компенсации потерь холостого хода источником напряжения, включенным параллельно испытуемому двигателю, требует отдельного рассмотрения.

5. Компенсация потерь холостого хода источником напряжения, включенным параллельно. При данном способе компенсации потерь небалансная электромагнитная мощность испытуемых электромашин создаётся за счет подпитки обмотки якоря испытуемого двигателя током параллельного источника электрической мощности [2]. Как правило, такой источник называют линейным генератором (преобразователем).

Строго говоря, исходя из электромеханических принципов обеспечения взаимной нагрузки электромашин [4], данный источник электрической мощности должен быть источником тока. Учитывая тот факт, что потери холостого хода не зависят от температуры перегрева обмоток электрической машины, стабилизация частоты вращения при стабилизированном токе в последовательном контуре обмоток испытуемых электромашин может быть достигнута путем обеспечения постоянства тока параллельного источника. При этом в цепи обратной связи системы автоматического управления

используется датчик тока параллельного источника электрической мощности. Это в значительной степени смягчает характер протекания переходных и аварийных процессов в системе взаимного нагружения.

Широкое распространение систем взаимной нагрузки с параллельным источником напряжения объясняется, прежде всего, простотой ручного регулирования напряжения на испытуемых электромашин.

По своей сути такой источник является стабилизатором напряжения. Как правило, это генератор постоянного тока с многократным запасом мощности, приводимый во вращение асинхронным двигателем. Жесткость характеристики асинхронного двигателя и насыщенность магнитной системы генератора обеспечивают удовлетворительную стабилизацию напряжения на испытуемых электромашин. При переходных процессах электромашинный источник может переходить в двигательный режим и допускает многократные кратковременные перегрузки по току. При использовании статического преобразователя стабилизация напряжения на его выходе требует высокой степени защиты данного источника от перегрузок при переходных и аварийных процессах.

Как показывает опыт эксплуатации испытательных станций, появление кругового огня на одной из испытуемых электромашин практически всегда влечет за собой круговой огонь на коллекторе линейного генератора. Выход из строя линейного генератора – нередкий случай в опыте эксплуатации испытательных станций без применения специальной токовой защиты в цепи параллельного источника напряжения.

На рис. 5 приведена функциональная схема контура стабилизации угловой скорости для систем взаимного нагружения с параллельным источником. Контур включает в себя датчик тока подпитки якоря испытуемого генератора ЗТП, звено сравнения ЗС, управляющий элемент УЭ, источник напряжения ИН, электрический контур испытуемых электромашин ЭМ, их механическая часть (роторы) ММ и датчик тока подпитки ДТП.

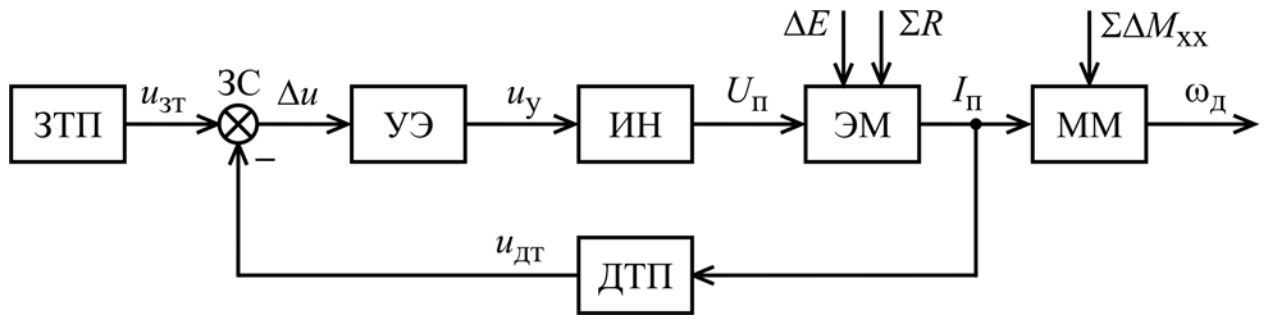


Рис. 5. Функциональная схема контура стабилизации угловой скорости

Управляющей координатой является напряжение на задатчике тока $i_{зт}$, а управляемой координатой – ток параллельного источника $I_{п}$, который в статическом режиме определяет угловую скорость $\omega_{д}$.

Напряжение управления u_y определяет величину напряжения $U_{п}$ на выходе источника и связано, в свою очередь, с напряжением рассогласования Δi принятым законом регулирования. Напряжение Δi определяется выражением (3).

Внешними воздействиями для рассматриваемого контура регулирования являются приведенная небалансная э.д.с. якорей ΔE и суммарное сопротивление обмоток испытуемых электромашин ΣR . Суммарный момент сопротивления $\Sigma \Delta M_{хх}$ является внешним воздействием для разомкнутой части функциональной схемы, включающей звено ММ. Зависимость $\Sigma \Delta M_{хх}(\omega_{д})$ определяет и статическую характеристику $\omega_{д}(I_{п})$, которая для данной испытуемой электромашин является однозначной.

Предложенные функциональные схемы систем автоматической стабилизации параметров тяговых электрических машин при их испытаниях по методу взаимной нагрузки позволяют применять системы взаимной нагрузки электромашин, обеспечение устойчивости которых при ручном управлении представляет существующую проблему [2].

Список литературы

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые / Государственный стандарт ССР. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 50с.
2. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоиздат, 1984. – 408 с.
3. Афанасов А. М. Энергетические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 26. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 34-38.
4. Афанасов А. М. Электромеханические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 27. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 42-46.