

Электротехника

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с января 1930 года

№ 2 ФЕВРАЛЬ 1995

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Копылов И.П., Соини Ю.П., Гуляев И.В., Байшев В.Ф. Обобщенная электромеханическая система 2

Шимберев В.Б. Разработка средств САПР конструкций малошумных электрических машин малой мощности с использованием конечных элементов моделей 5

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Крайнов С.В., Таратута И.П., Нечаев О.П. Пути развития статических тиристорных компенсаторов 8

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Бунин А.Г., Дорогуца В.А., Желонин В.А., Мелешко И.Ю., Фрахов С.Ю. Система программ математического моделирования силовых трансформаторов 12

НИЗКОВОЛЬТНАЯ ТЕХНИКА

Зекцер Д.М. Математическое моделирование процессов сохранности электротехнических аппаратов и устройств 16

Лазимов Т.М. Аналитическое выражение для сопротивлений электрически однородной земли при учете ее диэлектрических свойств 18

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Стародубцев Ю.Н., Кейлиги В.Н., Белозеров В.Я. Ленточные магнитопроводы из быстрозакаленных сплавов ГАММАМЕТФ с высокой магнитной проницаемостью 22

СТАНДАРТЫ

Николаева Т.А., Писарева В.А. Проблемы национальной и региональной стандартизации 26

ИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕХНИКА

Баркова Л.В., Геворкян Э.Т., Тюрина М.В. Взаимосвязь энергии активации термоокис-

лительной деструкции с элементным составом полимерных электроизоляционных материалов 28

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ

Ямпольский В.З., Комагоров В.Л., Зимин М.С. Критерии выбора архитектур управленческих информационных вычислительных систем на базе типовых локальных вычислительных сетей 31

Щелькалов Ю.Я., Герасимов Е.Б., Казаков Ю.Б., Тихонов А.И. Исследование сходимости решения сопряженных нелинейных полевых задач 35

Герасимов Е.Б., Щелькалов Ю.Я. Исследование способа интенсификации теплообмена поверхности диэлектриков 37

Будников Н.И., Кашкан В.И. Влияние взаимного расположения сверхпроводниковых катушек на их электромагнитные параметры 40

Чубрин В.А. Использование намагниченности и магнитного момента сил для определения характеристик магнитотвердых материалов в точке $(BH)_{max}$ 44

Иманов Г.И., Красавина М.А., Лукин С.А., Попов Н.М., Пугачев С.И. Физические и технологические задачи ультразвукового формообразования оксидноцинковых варисторов 47

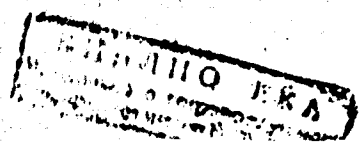
Куликов В.И., Прохоров Л.Н., Коньков Н.В., Парилова Г.А., Сытлини С.Н. Нитридная керамика для изделий силовой электроники 51

Красавина М.А., Пугачев С.И., Степенков В.В. Характеристики частичных разрядов ограничителей перенапряжений, изготовленных по различным технологиям 56

ХРОНИКА

I-я Международная конференция по электротехнике и электротехнологии «МКЭЭ-94» 59

Международный консорциум «Ново-техно» 60



Обобщенная электромеханическая система

И.П. КОПЫЛОВ, Ю.П. СОНИН, доктора техн. наук, профессора,
И.В. ГУЛЯЕВ, канд. техн. наук, В.Ф. БАЙНЕВ, инж.

Развитие электромеханики сопровождается эволюцией понятия обобщенной электрической машины. Известно, что в общем случае обобщенную электрическую машину можно представить как многофазный обобщенный электромеханический преобразователь с m, n обмотками на статоре и роторе (ОЭП) [1]. Однако, учитывая органическую связь современных ЭП с управляемыми полупроводниковыми преобразователями электрической энергии в различных областях регулируемого электропривода, целесообразно ввести новую концепцию обобщенной электрической машины как обобщенной электромеханической системы (ОЭС). На рис. 1 представлена структурная схема ОЭС, где $ПЧ_s, ПЧ_r$ — преобразователи частоты в его статорной и роторной обмотках; P_s, P_r — регуляторы преобразователей частоты; $ЗА_s, ЗА_r$ — задатчики амплитуды напряжений статора и ротора ОЭП; $ЗЧ_s, ЗЧ_r$ — задатчики частоты этих напряжений; $ЗУ_s, ЗУ_r$ — задатчики угла фазового регулирования инверторных звеньев $ПЧ_s$ и $ПЧ_r$; ДС — датчик скорости вращения ротора; ДПП — датчик положений результирующего магнитного

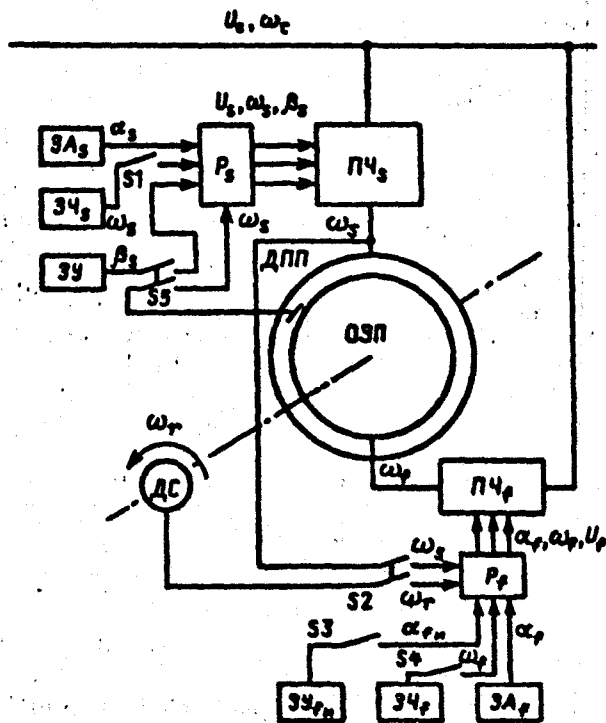


Рис. 1. Структурная схема обобщенной электромеханической системы

поля ОЭП. У ОЭС можно выделить три основных рабочих режима: «обобщенный асинхронный» режим ОАД, «обобщенный синхронный» режим ОСД [2] и «обобщенный режим машины постоянного тока» ОДПТ. Таким образом, в зависимости от режима возможны три варианта ОЭС.

1. Электромеханическая система обобщенной асинхронной машины (рис. 1), например, работающей в двигательном режиме (ЭСОАД) с широкой регулировкой скорости вращения изменением амплитуды и частоты напряжения статора двигателя по заданному закону регулятором $P_s(S1)$ преобразователя $ПЧ_s$. Условие установившегося режима работы электрической машины $\omega_r = \omega_s - \omega$, обеспечивается у ЭСОАД регулятором $P_r(S2, S3)$ преобразователя $ПЧ_r$. Последний одновременно позволяет регулировать амплитуду и фазу напряжения и тока ротора ОАД с целью поддержания на зажимах обмотки статора двигателя $\cos \varphi = 1$ или опережающего в диапазоне его рабочих нагрузок.

Статическая устойчивость ЭСОАД при изменении нагрузки на валу двигателя обеспечивается соответствующим изменением скорости вращения ω_r и угловой частоты напряжения и тока ротора ω_r .

2. Электромеханическая система обобщенной синхронной машины (рис. 1), у которой в двигательном режиме (ЭСОАД) амплитуда и частота напряжения на обмотке якоря регулируются по требуемому закону с помощью $ПЧ_s(S1)$, а $ПЧ_r$ в цепи обмотки возбуждения поддерживает неизменную частоту $\omega_r = \text{const}(S4)$ и $\cos \varphi = 1$ или опережающей на якоре СД.

Статическая устойчивость ЭСОАД при изменении нагрузки обеспечивается необходимым углом нагрузки с сохранением неизменности скорости вращения $\omega_r = \text{const}$.

3. Электромеханическая система обобщенной машины постоянного тока или обобщенного двигателя постоянного тока (ЭСОДПТ) (рис. 2), которую можно получить из ОЭС с $ПЧ_s$ и $ПЧ_r(S4, S5)$ при ее управлении во всех режимах работы ОДПТ по следующим законам:

поддержание примерного постоянства угла сдвига фаз первых гармоник напряжения и тока якоря — $\varphi_1 = \text{const}$ с тактовой самосинхронизацией по положению результирующего магнитного поля

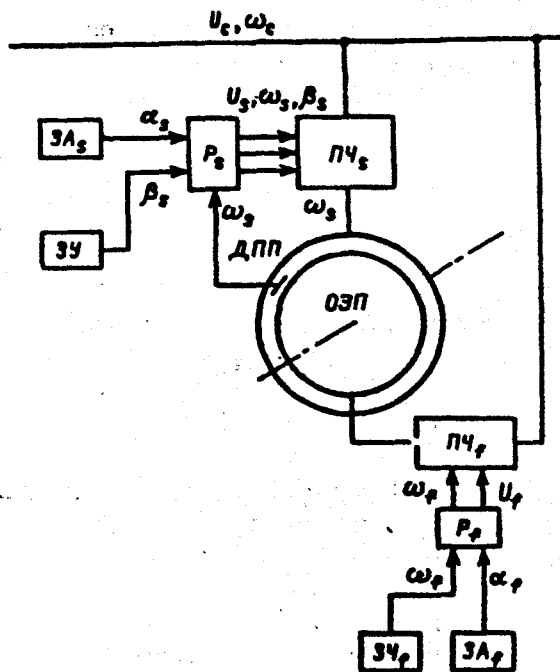


Рис. 2. Структурная схема электромеханической системы обобщенного двигателя постоянного тока

(ДПП) или фазе напряжения якоря; поддержание постоянства частоты возбуждения $\omega_f = \text{const}$; превышение МДС обмотки возбуждения над МДС обмотки якоря; регулирование скорости вращения ОДПТ теми же способами, что и у ДПТ.

Указанные законы управления ЭСОДПТ можно реализовать только в том случае, если обмотка якоря ОДПТ питается от ПЧ, с инверторным звеном по типу инвертора тока (ИТ), а его обмотка возбуждения — от ПЧ, с инвертором по типу инвертора напряжения (ИН).

Статическая устойчивость ЭСОДПТ при изменении момента сопротивления на валу обеспечивается одновременным изменением угла нагрузки и скорости вращения двигателя.

Варианты обобщенной электромеханической системы могут быть описаны в установившихся режимах работы соответствующими системами векторных уравнений электромеханического равновесия, если использовать метод изображающих векторов в синхронных координатах статора (якоря) ОЭП. Так, для «обобщенного асинхронного» режима (ОАД) она будет представлена следующим образом (о.е.):

$$\underline{U}_s = -\underline{E}_s + (r_s + j\nu_s x_{so}) \underline{I}_s; \quad (1)$$

$$\underline{U}_f = -\underline{E}_f + (r_f + js_0 \nu_s x_{fo}) \underline{I}_f; \quad (2)$$

$$\underline{E}_s = -j\nu_s x_{sf} (\underline{I}_s + \underline{I}_f); \quad (3,а)$$

$$\underline{E}_f = -js_0 x_{sf} (\underline{I}_s + \underline{I}_f); \quad (3,б)$$

$$M = \text{Re } j x_{sf} (\underline{I}_f \underline{I}_s), \quad (4)$$

где $\underline{U}_s, \underline{U}_f$ — изображающие векторы напряжений обмоток статора и ротора; $\underline{E}_s, \underline{E}_f$ — изображающие векторы ЭДС обмоток статора и ротора; $\underline{I}_s, \underline{I}_f$ — изображающие векторы токов этих обмоток; r_s, r_f — активные сопротивления обмоток статора и ротора; x_{so}, x_{fo}, x_{sf} — индуктивные сопротивления рассеяния и взаимной индукции этих обмоток; $\nu_s = \pm \frac{\omega_s}{\omega_0}$ — относительная частота напряжения статора; $s_0 = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_0} = \pm \frac{\omega_f}{\omega_0}$ — относительная частота напряжения обмотки ротора; $\omega_0 = \omega_6$ — частота, при которой определены сопротивления обмоток.

Система уравнений ОЭС для установившегося «обобщенного синхронного» режима ОСД и «обобщенного режима двигателя постоянного тока» ОДПТ, включающая выражения входных характеристик ИТ ПЧ, якоря с естественной и искусственной коммутациями [3], следующая [3]:

$$\underline{U}_s = -\underline{E}_{s0} + (r_s + j\nu_s x_{so}) \underline{I}_s + j\nu_s x_{sf} \underline{I}'_f; \quad (5)$$

$$\underline{U}_f = (r_f + js_0 x_f) \underline{I}'_f + (r_f + js_0 x_{fo}) \times \times \underline{I}'_f + js_0 x_{sf} \underline{I}'_f; \quad (6)$$

$$\underline{L}_0 = \underline{L}_s + \underline{L}'_f; \quad (7)$$

$$\underline{L}_f = \underline{L}'_f + \underline{L}'_f; \quad (8)$$

$$M = \text{Re } j x_{sf} (\underline{L}_f \underline{I}'_s); \quad (9)$$

$$U_{db} = \frac{3\sqrt{3} [\cos(\beta - \gamma) + \cos\beta] U_s}{2\pi} + 2\Delta U; \quad (10)$$

$$U_{db} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_s \left\{ \cos(\beta - \gamma') + \frac{\sigma_f x_{sf} I_s}{U_s} [(y'\epsilon)^2 + 1] - \frac{U_{cm}}{3\sqrt{3} U_s} \gamma' \right\} + 2\Delta U, \quad (11)$$

где $\underline{E}_{s0} = -j\nu_s x_{sf} \underline{I}'_f$ — изображающий вектор ЭДС якоря в режиме холостого хода ($\underline{I}_s = 0$); \underline{I}'_0 — вектор результирующего тока нагрузки; $\underline{I}'_f, \underline{I}'_f$ — векторы составляющих тока возбуждения в режимах холостого хода и нагрузки машины ОЭП; U_{db} — входное напряжение ИТ якоря; ΔU — внутреннее падение напряжения в тиристорах плеч ИТ; $U_{cm} = \frac{\pi \gamma'}{2\sqrt{6} \omega_s C} I_s$ — амплитуда напряжения на коммутирующем конденсаторе; $\epsilon = \frac{\omega_{LC}}{\omega_s}$ — относительная угловая частота собственных колебаний коммутационного контура ($\omega_{LC} = 1/\sqrt{2L_s C}$); β, γ — углы опережения включения тиристоров и коммутации ИТ; γ' — угол перезаряда коммутирующего конденсатора; α — коэффициент рассеяния машины.

На рис. 3а, б представлены векторные диаграммы напряжений и токов ОАД, ОСД и ОДПТ при $s_0 > 0$. Причем для ОСД и ОДПТ при питании обмоток якоря от ИТ ПЧ, с естественной коммутацией угол $\varphi_1 = \beta - \gamma/2$, а от

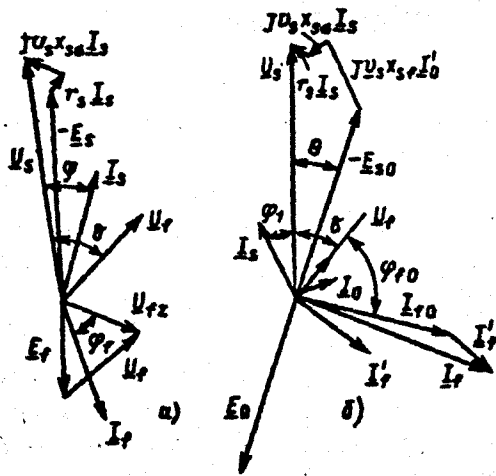


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений и токов: а — ОАД; б — ОСД и ОДПТ

ИТ с искусственной коммутацией $\varphi_1 = \beta - \gamma - \gamma'$. Электромагнитный вращающий момент ОЭП указанных вариантов ОЭС выражается следующим образом:

1. ОАД

$$M = \frac{r_s z_f^2 + r_f (1-s_0) v_s x_f \sigma x_f U_s^2 - v_s x_f \sigma \{ (r_f r_f - \sigma v_s x_f \sigma x_f) \sin \delta + (r_s r_f - \sigma v_s x_s s_0 x_f)^2 + (r_s s_0 x_f + r_f v_s x_s)^2 \}}{(r_s r_f - \sigma v_s x_s s_0 x_f)^2 + (r_s s_0 x_f + r_f v_s x_s)^2} U_s U_f; \quad (12)$$

2. ОСД

$$M = \frac{x_f I_{f0} [r_s z_f^2 (U \cos \theta - E_{r0}) + v_s x_s z_f U \sin \theta] + r_f s_0 x_f^2 (U_s - E_{r0} \cos \theta) U_s}{(r_s r_f - \sigma v_s x_s s_0 x_f)^2 + (r_s s_0 x_f + r_f v_s x_s)^2 + r_f s_0 x_f^2 (U_s - E_{r0} \cos \theta) U_s}; \quad (13)$$

3. ОДПТ ($\varphi_1 = 0$ и $r_s = 0$)

$$M = x_f^2 I_{f0} \frac{(r_f^2 s_0^2 x_f^4 + x_s^2 z_f^2) (0.5 x_s z_f^2 \sin 2\theta + r_f s_0^2 x_f^2 \sin^2 \theta)}{x_s^4 z_f^4 z_f^2}; \quad (14)$$

где θ — угол нагрузки

$$z_f^2 = r_f^2 + \sigma^2 s_0^2 x_f^2.$$

Электромагнитный вращающий момент вентильного двигателя (ВД) постоянного тока с явнополюсным ротором — частный случай (14) при $s_0 = 0$ [4]

$$M = \frac{1}{2} \frac{x_f^2 I_{f0}^2}{x_s} \sin 2\theta. \quad (15)$$

При частотном регулировании скорости вращения ОАД или ОСД по закону $U_s/v_s = f(M)$ и одновременном поддержании $\cos \varphi = \text{const}$ частота скольжения ротора ОАД определяется выражением ($r_s = 0$)

$$s_0 = \frac{v_s \sigma x_f (\cos \delta - \sin \delta \operatorname{tg} \varphi) U_f + \sqrt{v_s^2 \sigma^2 x_f^2 (\cos \delta - \sin \delta \operatorname{tg} \varphi)^2 U_f^2 - 4 r_f \sigma \{ (r_f + \alpha x_f \operatorname{tg} \varphi) U_s^2 - v_s x_f (\sin \delta + \cos \delta \operatorname{tg} \varphi) U_s U_f \}}}{2 \sigma x_f U_s}; \quad (16)$$

У ОСД $s_0 = \text{const}$ и частота вращения ротора $v_r = v_s - s_0$. Для ОДПТ частота вращения ротора соответственно равна ($s_0 = \text{const}$, $\varphi_1 = 0$)

$$v_r = \frac{x_s z_f^2 U_s - r_s z_f^2 x_f I_{f0} \sin \theta}{x_f (x_s z_f^2 \cos \theta + r_f s_0 x_f^2 \cos \theta) I_{f0}} - s_0. \quad (17)$$

Отсюда следует, что при заданных значениях напряжения якоря — U_s и тока возбуждения холостого хода — I_{f0} частота вращения ротора v_r зависит от угла нагрузки θ .

Для ВД постоянного тока ($s_0 = \text{const}$; $r_s = 0$) [4]

$$v_r = \frac{U_s}{x_f I_{f0} \cos \theta}. \quad (18)$$

Согласно выражению (17) скорость вращения ОДПТ может регулироваться изменением напряжения якоря U_s , или тока возбуждения ХХ — $I_{f0}(U_r)$.

Вывод

Обобщенная электромеханическая система является основой современного регулируемого электропривода и представляет собой обобщенный электромеханический преобразователь со статическими преобразователями частоты в его обмотках статора и ротора.

Список литературы

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1984.
2. Шакарям Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Соини Ю.П. Статические характеристики машины двойного питания в режиме вентильного двигателя // Электричество. 1985. № 4.
4. Аракелян А.К., Афанасьев А.А., Чиликини М.Г. Вентильный электропривод с синхронным двигателем и вентильным инвертором. М.: Энергия, 1977.