

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Розглянуто принципово можливі варіанти забезпечення взаємного навантаження електричних машин постійного струму.

Рассмотрены принципиально возможные варианты обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока.

The possible variants of providing the mutual loading of electric machines of direct current are considered on principle.

Решение общей проблемы выбора рациональной схемы для испытания тяговых электрических машин требует предварительного определения всех возможных вариантов обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока [1, 2]. Для решения этой задачи необходим системный подход, основанный на анализе общих принципов обеспечения процесса взаимной нагрузки. В результате такого анализа должны быть определены соотношения электромеханических параметров системы, на основании которых смогут быть построены конкретные электромеханические схемы испытательного стенда всех возможных вариантов.

Проведем такой анализ для системы взаимной нагрузки, структура которой не определена, но известен принцип энергетических преобразований в ней.

Для обеспечения процесса взаимной нагрузки электрических машин с энергетической точки зрения необходимы следующие условия:

- обеспечение передачи электрической мощности от генератора двигателю;
- обеспечение передачи механической мощности от двигателя генератору;
- компенсация всех потерь, которые возникают при передаче мощности.

С электромеханической точки зрения для выполнения этих условий требуется:

- наличие устройств передачи электрической мощности;
- наличие устройств передачи механической мощности;
- положительная результирующая электродвижущая сила в цепи электрических преобразователей, компенсирующая падения напряжений от протекания токов;
- положительный результирующий момент в цепи механических преобразований, компен-

сирующий потери момента от вращения роторов электрических машин.

Основной контур энергетических преобразований любой схемы взаимной нагрузки можно условно разбить на две цепи:

- цепь электрических преобразований выходной мощности генератора во входную мощность двигателя;
- цепь механических преобразований выходной мощности двигателя во входную мощность генератора.

Универсальная схема замещения преобразователя электрической мощности представлена на рис. 1.

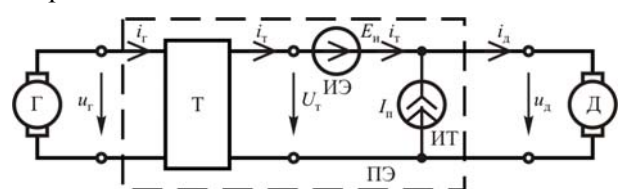


Рис. 1

Преобразователь электрической мощности ПЭ (обведен пунктиром) включает в себя пассивный четырехполюсник Т, представляющей собой конвертор постоянного напряжения, источник электродвижущей силы ИЭ и источник тока ИТ. Ко входу преобразователя подключен якорь генератора Г, а к выходу – якорь двигателя Д, при этом имеется в виду возможность независимого регулирования магнитных потоков испытываемых машин (обмотки возбуждения на схеме не показаны). В данной схеме замещения предусмотрены все теоретически возможные виды электрических преобразований:

- трансформация напряжения (тока);
- добавка электродвижущей силы (E_n);
- подпитка якоря двигателя током (I_n).

В принципе и источник э.д.с., и источник тока могут быть включены в первичную цепь конвертора Г. Для проведения данного анализа это непринципиально.

Отметим, что на приведенной схеме (рис. 1) не показаны диссипативные элементы самого преобразователя ПЭ. Такое упрощение вполне допустимо для анализа, целью которого является определение самих принципов создания взаимной нагрузки электромашин. Таким образом, будем рассматривать работу данной универсальной схемы без учета потерь мощности в преобразователе ПЭ.

Работа преобразователя будет описываться системой уравнений

$$\begin{cases} u_d = u_r \cdot K_u + E_n; & (1) \\ i_d = i_r \cdot K_I + I_n, & (2) \end{cases}$$

где u_d – напряжение на входе двигателя;

u_r – напряжение на выходе генератора;

i_d – ток двигателя;

i_r – ток генератора;

K_u – коэффициент передачи напряжения;

K_I – коэффициент передачи тока.

Коэффициенты передачи K_u и K_I связаны между собой соотношением

$$K_u \cdot K_I = 1. \quad (3)$$

Напряжения на зажимах двигателя и генератора:

$$u_d = C_d \cdot \Phi_d \cdot \omega_d + i_d \cdot R_d; \quad (4)$$

$$u_r = C_r \cdot \Phi_r \cdot \omega_r - i_r \cdot R_r, \quad (5)$$

где C_d и C_r – конструктивные постоянные двигателя и генератора;

Φ_d и Φ_r – магнитные потоки двигателя и генератора;

ω_d и ω_r – угловые скорости валов двигателя и генератора;

R_d и R_r – внутренние сопротивления двигателя и генератора.

Универсальная схема замещения преобразователя механической мощности представлена на рис. 2.

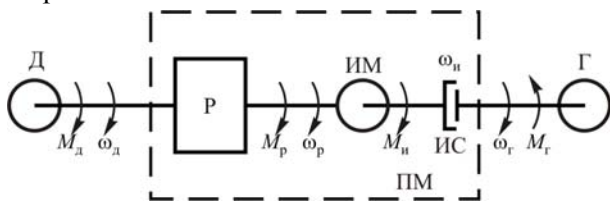


Рис. 2

Преобразователь ПМ включает в себя механический редуктор Р, источник дополнительного момента (дополнительный двигатель с моментом M_n) и источник дополнительной угловой скорости ИС (устройство добавки угловой скорости ω_n). Со входом преобразователя связан вал ротора двигателя Д, а с выходом – вал ротора генератора Г.

В данной схеме замещения предусмотрены все теоретически возможные виды механических преобразований:

– трансформация механического момента (угловой скорости);

– добавка крутящего момента дополнительным источником момента;

– добавка угловой скорости дополнительным источником угловой скорости.

Дополнительные источники механической мощности в данной схеме могут быть включены в первичную механическую цепь редуктора.

Необходимо отметить полную аналогию процессов преобразования электрической и механической мощностей по схемам, представленным на рис. 1 и 2. Аналогами напряжений электрической схемы являются моменты механической схемы. Аналогами токов являются угловые скорости. Аналогами источников э.д.с. и токов являются источники механического момента и угловой скорости соответственно. Аналогом конвертора постоянного напряжения (тока) является редуктор.

На схеме замещения преобразователя механической мощности (рис. 2) так же, как и в схеме замещения электрического преобразователя, не показаны диссипативные элементы. И в дальнейшем его работа будет рассматриваться без учета внутренних потерь. Работа преобразователя описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} M_r = M_d \cdot K_m + M_n; & (6) \\ \omega_r = \omega_d \cdot K_\omega + \omega_n, & (7) \end{cases}$$

где M_r – момент на валу генератора;

M_d – момент на валу двигателя;

ω_d – угловая скорость вала двигателя;

ω_r – угловая скорость вала генератора;

K_m – коэффициент передачи момента;

K_ω – коэффициент передачи угловой скорости.

Коэффициенты передачи K_m и K_ω связаны между собой соотношением

$$K_m \cdot K_\omega = 1. \quad (8)$$

Моменты на валах двигателя и генератора:

$$M_d = C_d \cdot \Phi_d \cdot i_d - \Delta M_d; \quad (9)$$

$$M_r = C_r \cdot \Phi_r \cdot i_r + \Delta M_r, \quad (10)$$

где ΔM_d и ΔM_r – потери момента двигателя и генератора, обусловленные механическими и магнитными потерями мощности в электромашинах.

Рассмотрим условия компенсации электрических потерь в стенде взаимной нагрузки по универсальным соотношениям основных параметров схемы, полученным выше.

Объединив формулы (1), (4), (5), (7), после преобразований получим выражение, характеризующее баланс напряжений в электрической части схемы взаимной нагрузки в установившемся режиме

$$i_d R_d + i_r R_r K_U = (C_r \Phi_r K_U K_\omega - C_d \Phi_d) \omega_d + C_r \Phi_r \omega_n K_U + E_n. \quad (11)$$

Левая часть выражения (11) представляет собой сумму падений напряжений на внутренних сопротивлениях испытуемых электромашин, приведенную к цепи двигателя. Приведение всех электрических процессов к цепи двигателя более логично, чем к цепи генератора в связи с тем, что двигатель является конечным элементом в общей цепи электрических преобразований и единственным потребителем электрической мощности в стенде взаимной нагрузки.

Правая часть выражения (11) представляет собой сумму электродвижущих сил, которыми согласно рис. 1 может быть скомпенсирована сумма падений напряжений, приведенная в его левой части. Каждое из слагаемых правой части уравнения (11) определяет свой возможный способ (или способы) компенсации электрических потерь в схеме взаимной нагрузки. Рассмотрим каждый из них отдельно.

Первый способ включает в себя несколько возможных вариантов сочетания электромагнитных параметров самих испытуемых электромашин и описывается уравнениями:

$$\omega_n = 0; \quad (12)$$

$$E_n = 0; \quad (13)$$

$$i_d R_d + i_r R_r K_U = (C_r \Phi_r K_U K_\omega - C_d \Phi_d) \omega_d. \quad (14)$$

Если рассматривать работу стенда в установившемся режиме, при значениях токов якорей испытуемых электромашин, отличных от нуля, уравнение (14) может быть записано как условие покрытия электрических потерь в виде системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_d > 0; \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_r \Phi_r K_U K_\omega > C_d \Phi_d. \end{array} \right. \quad (16)$$

Условие (15) должно быть обеспечено путем покрытия магнитных и механических потерь, в данном стенде будем рассматривать его, как выполненное.

В качестве параметров, регулирование которых принципиально может быть осуществлено в схеме, следует рассматривать магнитные потоки Φ_r , Φ_d и коэффициенты передачи K_U , K_ω .

Наиболее очевидным являются три из всех возможных вариантов выполнения условия (16), которые могут быть представлены для однотипных электромашин ($C_r = C_d$) в виде объединения трех систем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_r > \Phi_d; \\ K_U = 1; \\ K_\omega = 1. \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_r = \Phi_d; \\ K_U > 1; \\ K_\omega = 1. \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_r = \Phi_d; \\ K_U = 1; \\ K_\omega > 1. \end{array} \right. \quad (19)$$

Для вариантов, формализации которых представлены системами (17) и (19), характерно превышение электромагнитной мощности генератора над электромагнитной мощностью двигателя. Компенсация электрических потерь здесь осуществляется источником механической мощности.

В варианте по системе (18) электромагнитная мощность генератора меньше электромагнитной мощности двигателя, и компенсация электрических потерь осуществляется источником электрической мощности.

Очевидная рациональность каждого из приведенных вариантов в сравнении с другими, принципиально существующими, отличными от данных, определяется, прежде всего, необходимостью использования только одного регулятора. Предпочтение использования одного из обозначенных вариантов будет определяться степенью простоты его технической реализации и существующими ограничениями регулировочных свойств системы в целом. Рациональным с учетом данных ограничений может

оказаться вариант, отличный от приведенных, но полученный путём их сочетания.

Второе слагаемое правой части уравнения (11) определяет отдельный возможный способ компенсации электрических потерь в схеме взаимной нагрузки, который будет иметь формализацию в виде уравнений:

$$\Phi_d = \Phi_r; \quad (20)$$

$$K_v = 1; \quad (21)$$

$$K_\omega = 1; \quad (22)$$

$$E_n = 0; \quad (23)$$

$$i_d R_d + i_r R_r = C_r \Phi_r \omega_n. \quad (24)$$

Условие покрытия электрических потерь при значениях токов якорей электромашин, отличных от нуля, будет описываться неравенством

$$C_r \Phi_r \omega_n > 0 \quad (25)$$

или, учитывая, что $C_r \Phi_r$ положительно,

$$\omega_n > 0. \quad (26)$$

При таком варианте компенсации электрических потерь электромагнитная мощность генератора больше электромагнитной мощности двигателя.

Функционально источник угловой скорости представляет собой устройство передачи неизменного момента при повышении угловой скорости вала на заданную величину ω_n . В отличие от редуктора Р, который является пассивным элементом схемы (рис. 2), источник угловой скорости представляет собой источник механической мощности. Несмотря на то, что конструкция такого устройства может оказаться неоправданно сложной, не учитывать существования такого варианта покрытия электрических потерь в общем анализе будет некорректно.

Третье слагаемое правой части уравнения (11) определяет наиболее распространенный в существующих схемах взаимной нагрузки способ компенсации электрических потерь – источником э.д.с. Формализация этого способа имеет вид:

$$\Phi_d = \Phi_r; \quad (27)$$

$$K_v = 1; \quad (28)$$

$$K_\omega = 1; \quad (29)$$

$$\omega_n = 0; \quad (30)$$

$$i_d R_d + i_r R_r = E_n. \quad (31)$$

Условие покрытия электрических потерь при значениях токов якорей электромашин, отличных от нуля, будет выглядеть

$$E_n > 0. \quad (32)$$

Таким образом, электрические потери в этом варианте компенсируются источником электрической мощности при равенстве электромагнитных мощностей двигателя и генератора.

Рассмотрим условия компенсации магнитных и механических потерь в схеме взаимной нагрузки по универсальным соотношениям её основных параметров.

Объединив формулы (2), (6), (9), (10), после преобразований получим уравнение, характеризующее баланс моментов в механической части схемы взаимной нагрузки при установленном режиме

$$\Delta M_r + \Delta M_d K_m = (C_d \Phi_d K_r K_m - C_r \Phi_r) i_r + C_d \Phi_d I_n K_m + M_n. \quad (33)$$

Левая часть уравнения (33) представляет собой сумму потерь механических моментов на валах испытываемых электромашин, приведенную к валу генератора, который является конечным элементом в цепи механических преобразований и единственным потребителем механической мощности в стенде взаимной нагрузки.

Правая часть уравнения (33) представляет собой сумму моментов, которыми в соответствии со схемой на рис. 2 может быть скомпенсирована сумма потерь моментов, приведенная к валу генератора. Каждое слагаемое правой части уравнения (33) определяет отдельный возможный способ (способы) компенсации магнитных и механических потерь в схеме взаимной нагрузки. Рассмотрим каждый из них отдельно.

К первому способу, соответствующему первому слагаемому правой части выражения (33), относятся варианты, отвечающие уравнениям:

$$I_n = 0; \quad (34)$$

$$M_n = 0; \quad (35)$$

$$\Delta M_r + \Delta M_d K_m = (C_d \Phi_d K_r K_m - C_r \Phi_r) i_r. \quad (36)$$

Условие покрытия магнитных и механических потерь в схеме взаимной нагрузки при вращающихся валах электромашин будет иметь вид:

$$\begin{cases} i_r > 0; \\ C_d \Phi_d K_I K_M > C_r \Phi_r. \end{cases} \quad (37)$$

$$(38)$$

Условие (37) должно быть обеспечено путем компенсации электрических потерь в схеме методами, описанными выше. Будем считать его выполненным.

В качестве регулируемых параметров схемы взаимной нагрузки будем рассматривать магнитные потоки Φ_d , Φ_r и коэффициенты передачи K_I , K_M (или K_U , K_ω).

Три наиболее очевидные из всех возможных вариантов выполнения условия (38) могут быть представлены в виде объединения трех систем:

$$\begin{cases} \Phi_d > \Phi_r; \\ K_I = 1; \\ K_M = 1. \end{cases} \quad (39)$$

$$\begin{cases} \Phi_d = \Phi_r; \\ K_I > 1; \\ K_M = 1. \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} \Phi_d = \Phi_r; \\ K_I = 1; \\ K_M > 1. \end{cases} \quad (41)$$

Компенсация магнитных и механических потерь в вариантах, формализованных системами (39) и (41), осуществима с помощью источника электрической мощности при превышении электромагнитной мощностью двигателя электромагнитной мощности генератора.

В варианте, соответствующем системе (40), компенсация магнитных и механических потерь осуществляется источником механической мощности при положительной разнице электромагнитных мощностей генератора и двигателя.

Преимуществом каждого из описанных вариантов компенсации механических и магнитных потерь по условию (38) перед остальными, принципиально возможными по этому же условию, заключается в необходимости только одного регулятора. Окончательный выбор рационального варианта из всех возможных по условию (38) может быть осуществлен после анализа не только степени простоты реализации каждого из элементов, но и существующих ограничений регулировочных свойств всей системы в целом. Рациональным после такого анализа может оказаться любой из вариантов по условию (38), который может быть получен путем сочетания вариантов (39), (40), (41).

По второму слагаемому правой части уравнения (33) будем иметь вариант компенсации

магнитных и механических потерь, соответствующий уравнениям:

$$\Phi_d = \Phi_r; \quad (42)$$

$$K_I = 1; \quad (43)$$

$$K_M = 1; \quad (44)$$

$$M_{и} = 0; \quad (45)$$

$$\Delta M_r + \Delta M_d = C_d \Phi_d I_{и}. \quad (46)$$

Условие покрытия магнитных и механических потерь при вращении валов электромашин будет иметь вид

$$C_d \Phi_d I_{и} > 0 \quad (47)$$

или, учитывая, что $C_d \Phi_d$ положительно,

$$I_{и} > 0. \quad (48)$$

При таком варианте компенсации магнитных и механических потерь источником электрической мощности электромагнитная мощность двигателя будет больше электромагнитной мощности генератора.

Третьим слагаемым правой части уравнения (33) определяется вариант покрытия магнитных и механических потерь источником момента. Такой вариант будет описываться уравнениями

$$\Phi_d = \Phi_r; \quad (49)$$

$$K_I = 1; \quad (50)$$

$$K_M = 1; \quad (51)$$

$$I_{и} = 0; \quad (52)$$

$$\Delta M_r + \Delta M_d = M_{и}. \quad (53)$$

Условие покрытия магнитных и механических потерь при этом варианте

$$M_{и} > 0. \quad (54)$$

Магнитные и механические потери компенсируются источником механической мощности при равенстве электромагнитных мощностей двигателя и генератора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин [Текст] / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
2. Коварский, Е. М. Испытание электрических машин [Текст] / Е. М. Коварский, Ю. И. Янко. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

Поступила в редколлегию 26.03.2009.