

Афанасов А. М. Принципы синтеза схем взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного тока // Наук.-техн. збір. «Гірничя електромеханіка та автоматика». – 2010. – Вип. 85. – С. 183-189. (ISSN 0201-7814).

УДК 621.313.001.4

А.М. Афанасов, канд. техн. наук

(Украина, Днепрпетровск, Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта)

ПРИНЦИПЫ СИНТЕЗА СХЕМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Известен целый ряд схем взаимной нагрузки электромашин постоянного тока, отличающихся принципами обеспечения условий протекания тока и вращения их якорей [1]. Решение задачи выбора рациональной схемы испытания тяговых электромашин требует определения всех возможных вариантов обеспечения условий их взаимной нагрузки.

Принципиальная универсальная схема стенда взаимной нагрузки электромашин постоянного тока приведена на рис. 1. Схема включает в себя испытуемые электродвигатель M и генератор G , валы которых соединены между собой посредством преобразователя механической мощности ПМ. Электрически якорь генератора связан с якорем двигателя через преобразователь электрической мощности ПЭ. Обмотки возбуждения генератора и двигателя показаны отдельно. Схема является обобщённой и универсальной для любого варианта стенда взаимной нагрузки [2].

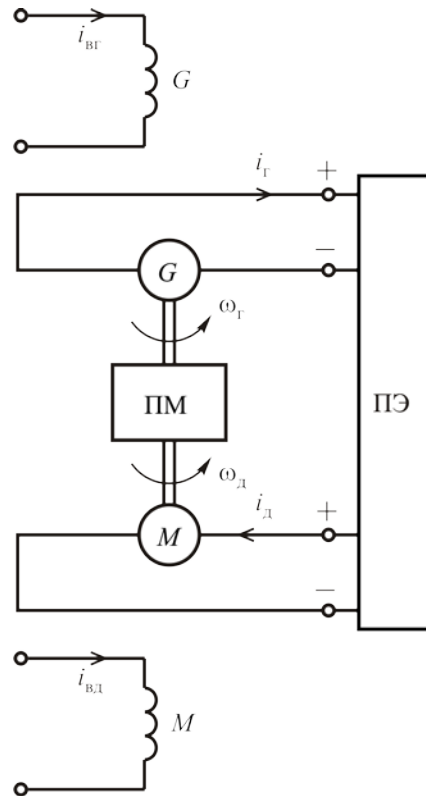


Рис. 1. Обобщенная схема взаимной нагрузки

Преобразователи ПЭ и ПМ могут включать в себя как пассивные, так и активные элементы. Обмотки возбуждения могут питаться токами $i_{вг}$ и $i_{вд}$ как независимо, так и последовательно с якорями. Токи якорей $i_{г}$, $i_{д}$ и угловые скорости $\omega_{г}$, $\omega_{д}$ связаны между собой соотношениями, определяемыми конфигурациями преобразователей ПЭ и ПМ.

В соответствии с электромеханическими принципами обеспечения взаимной нагрузки электромашин постоянного тока условие их взаимного нагружения можно выразить в виде системы [3]:

$$\begin{cases} \sum \Delta U = (C_{г} \Phi_{г} K_U K_{\omega} - C_{д} \Phi_{д}) \omega_{д} + C_{г} \Phi_{г} \omega_{и} K_U + U_{и}; & (1) \\ \sum \Delta M = (C_{д} \Phi_{д} K_I K_M - C_{г} \Phi_{г}) i_{г} + C_{д} \Phi_{д} I_{и} K_M + M_{и}, & (2) \end{cases}$$

где $\sum \Delta U$ – суммарное падение напряжений в электрических цепях схемы, приведенное к цепи якоря двигателя;

$\sum \Delta M$ – суммарные потери моментов в механической части схемы, приведенные к валу генератора;

$C_{г}$, $C_{д}$ – конструктивные постоянные генератора и двигателя соответственно;

$\Phi_{г}$, $\Phi_{д}$ – магнитные потоки генератора и двигателя соответственно;

K_U , K_I – коэффициенты преобразования ПЭ по напряжению и току соответственно;

K_M , K_ω – коэффициенты преобразования ПМ по моменту и угловой скорости соответственно;

ω_d – угловая скорость вала двигателя;

i_G – ток якоря генератора;

$U_{и}$ – напряжение дополнительного источника ПЭ;

$I_{и}$ – ток дополнительного источника ПЭ;

$M_{и}$ – момент дополнительного источника ПМ;

$\omega_{и}$ – угловая скорость дополнительного источника ПМ.

Уравнение (1) характеризует баланс напряжений в электрической схеме стенда в стационарном режиме и определяет пять независимых условий протекания токов якорей испытуемых электромашин. Обозначим каждое из них буквой латинского алфавита от *A* до *E*.

Условие *A*

$$U_{и} > 0. \quad (3)$$

Условие *B*

$$\omega_{и} > 0. \quad (4)$$

Условие *C*

$$\Phi_G > \Phi_d. \quad (5)$$

Условие *D*

$$K_\omega > 1. \quad (6)$$

Условие *E*

$$K_U > 1. \quad (7)$$

Условие *A* является достаточным. Способ компенсации электрических потерь для данного варианта является прямым и предполагает введение в электрическую цепь дополнительного источника электрической мощности.

Условие *B* является достаточным в случае обеспечения возбуждения испытуемого генератора *G*. Способ компенсации потерь является косвенным, так как предполагает преобразование механической мощности дополнительного источника в электрическую испытуемым генератором *G*.

Условия *C*, *D* и *E* не являются достаточными, так как требуют наличие дополнительного источника мощности. Эти условия обеспечивают компенсацию электрических потерь только в сочетании с вращением испытуемых электромашин. Способы компенсации электрических потерь являются косвенными.

Преобразование добавочной механической мощности в электрическую осуществляется испытуемым генератором G .

Уравнение (2) характеризует баланс моментов в механической части испытательного стенда в стационарном режиме и определяет пять независимых условий вращения валов испытуемых электромашин. По аналогии с условиями протекания токов обозначим данные условия буквами латинского алфавита от F до J .

Условие F

$$M_{и} > 0. \quad (8)$$

Условие G

$$I_{и} > 0. \quad (9)$$

Условие H

$$\Phi_{д} > \Phi_{г}. \quad (10)$$

Условие I

$$K_{м} > 1. \quad (11)$$

Условие J

$$K_{г} > 1. \quad (12)$$

Условие F является достаточным. Способ компенсации потерь вращения является прямым и предполагает введение в механическую цепь дополнительного источника механической мощности.

Условие G является достаточным в случае обеспечения возбуждения испытуемого двигателя M . Способ компенсации потерь является косвенным, так как требует преобразования добавочной электрической энергии в механическую испытуемым двигателем M .

Условия H , I и J не являются достаточными, так как требуют наличие дополнительного источника мощности. Компенсация потерь вращения обеспечивается только при сочетании любого из этих условий с протеканием токов нагрузки испытуемых электромашин. Способы компенсации потерь вращения являются косвенными. Преобразование электрической добавочной мощности в механическую осуществляется испытуемым двигателем M .

Взаимная нагрузка двигателя M и генератора G в соответствии с системой уравнений (1), (2) может быть обеспечена путём сочетания не менее двух условий, входящих в множества $\{A, B, C, D, E\}$ и $\{F, G, H, I, J\}$. Причём, условия, входящие в сочетание, должны быть из различных множеств и хотя бы одно из условий должно быть достаточным.

Техническая реализация каждого из условий $A-J$ требует материальных затрат, поэтому наиболее рациональным с точки зрения минимума себестоимости испытательного стенда будет множество сочетаний, каждое из которых будет включать по одному условию каждого из множества $\{A, B, C, D, E\}$ и $\{F, G, H, I, J\}$. С учётом того, что хотя бы одно из условий каждого сочетания должно быть достаточным, получим искомое множество из 16 сочетаний

$$X = \{AF, AG, AH, AI, AJ, BF, BG, BH, BI, BJ, CF, CG, DF, DG, EF, EG\}, \quad (13)$$

где $AF=A \wedge F$; $AG=A \wedge G$; $AH=A \wedge H$; $AI=A \wedge I$; $AJ=A \wedge J$; $BF=B \wedge F$; $BG=B \wedge G$; $BH=B \wedge H$; $BI=B \wedge I$; $BJ=B \wedge J$; $CF=C \wedge F$; $CG=C \wedge G$; $DF=D \wedge F$; $DG=D \wedge G$; $EF=E \wedge F$; $EG=E \wedge G$.

Для каждого из 16 сочетаний условий протекания тока и вращения валов якорей из множества X существует частная система уравнений баланса напряжений и моментов, получаемая из универсальной системы уравнений (1), (2).

Характеристики управляющих параметров, входящих в уравнения (1) и (2), для каждого сочетания из множества X приведены в таблице 1.

Рассмотрим каждое сочетание из множества X отдельно. Для тех вариантов, при которых магнитные потоки равны, принимаем $\Phi_{\Gamma} = \Phi_{\Delta} = \Phi$. Конструктивные постоянные электромашин принимаем равными $C_{\Gamma} = C_{\Delta} = C$.

Таблица 1

Характеристики управляющих параметров

Вариант сочетания	U_{Π}	ω_{Π}	$\Phi_{\Gamma} - \Phi_{\Delta}$	K_{ω}	K_U	M_{Π}	I_{Π}	K_M	K_I
AF	>0	0	0	1	1	>0	0	1	1
AG	>0	0	0	1	1	0	>0	1	1
AH	>0	0	<0	1	1	0	0	1	1
AI	>0	0	0	<1	1	0	0	>1	1
AJ	>0	0	0	1	<1	0	0	1	>1
BF	0	>0	0	1	1	>0	0	1	1
BG	0	>0	0	1	1	0	>0	1	1
BH	0	>0	<0	1	1	0	0	1	1
BI	0	>0	0	<1	1	0	0	>1	1
BJ	0	>0	0	1	<1	0	0	1	>1
CF	0	0	>0	1	1	>0	0	1	1
CG	0	0	>0	1	1	0	>0	1	1
DF	0	0	0	>1	1	>0	0	<1	1
DG	0	0	0	>1	1	0	>0	<1	1
EF	0	0	0	1	>1	>0	0	1	<1
EG	0	0	0	1	>1	0	>0	1	<1

$$AF: U_{\Pi} > 0; M_{\Pi} > 0.$$

$$\begin{cases} \sum \Delta U = U_{\text{н}}; & (14) \\ \sum \Delta M = M_{\text{н}}. & (15) \end{cases}$$

$$AG: U_{\text{н}} > 0; I_{\text{н}} > 0.$$

$$\begin{cases} \sum \Delta U = U_{\text{н}}; & (16) \\ \sum \Delta M = C\Phi I_{\text{н}}. & (17) \end{cases}$$

$$AH: U_{\text{н}} > 0; \Phi_{\text{д}} > \Phi_{\text{г}}; \Delta\Phi = \Phi_{\text{д}} - \Phi_{\text{г}}.$$

$$\begin{cases} \sum \Delta U = U_{\text{н}} - C\Delta\Phi\omega_{\text{д}}; & (18) \\ \sum \Delta M = C\Delta\Phi i_{\text{г}}. & (19) \end{cases}$$

$$AI: U_{\text{н}} > 0; K_{\omega} < 1; K_M > 1.$$

$$\begin{cases} \sum \Delta U = U_{\text{н}} - C\Phi\omega_{\text{д}}(1 - K_{\omega}); & (20) \\ \sum \Delta M = C\Phi i_{\text{г}}(K_M - 1). & (21) \end{cases}$$

$$AJ: U_{\text{н}} > 0; K_U < 1; K_I > 1.$$

$$\begin{cases} \sum \Delta U = U_{\text{н}} - C\Phi\omega_{\text{д}}(1 - K_U); & (22) \\ \sum \Delta M = C\Phi i_{\text{г}}(K_I - 1). & (23) \end{cases}$$

$$BF: \omega_{\text{н}} > 0; M_{\text{н}} > 0.$$

$$\begin{cases} \sum \Delta U = C\Phi\omega_{\text{н}}; & (24) \\ \sum \Delta M = M_{\text{н}}. & (25) \end{cases}$$

$$BG: \omega_{\text{н}} > 0; I_{\text{н}} > 0.$$

$$\begin{cases} \sum \Delta U = C\Phi\omega_{\text{н}}; & (26) \\ \sum \Delta M = C\Phi I_{\text{н}}. & (27) \end{cases}$$

$$BH: \omega_{\text{н}} > 0; \Phi_{\text{д}} > \Phi_{\text{г}}; \Delta\Phi = \Phi_{\text{д}} - \Phi_{\text{г}}.$$

$$\begin{cases} \sum \Delta U = C\Phi_{\text{г}}\omega_{\text{н}} - C\Delta\Phi\omega_{\text{д}}; & (28) \\ \sum \Delta M = C\Delta\Phi i_{\text{г}}. & (29) \end{cases}$$

BI: $\omega_{\text{н}} > 0$; $K_M > 1$; $K_\omega < 1$.

$$\begin{cases} \sum \Delta U = C\Phi\omega_{\text{н}} - C\Phi\omega_{\text{д}}(1 - K_\omega); \\ \sum \Delta M = C\Phi i_{\Gamma}(K_M - 1). \end{cases} \quad (30)$$

$$\sum \Delta M = C\Phi i_{\Gamma}(K_M - 1). \quad (31)$$

BJ: $\omega_{\text{н}} > 0$; $K_I > 1$; $K_U < 1$.

$$\begin{cases} \sum \Delta U = C\Phi\omega_{\text{н}} - C\Phi\omega_{\text{д}}(1 - K_U); \\ \sum \Delta M = C\Phi i_{\Gamma}(K_I - 1). \end{cases} \quad (32)$$

$$\sum \Delta M = C\Phi i_{\Gamma}(K_I - 1). \quad (33)$$

CF: $\Phi_{\Gamma} > \Phi_{\text{д}}$; $\Delta\Phi = \Phi_{\Gamma} - \Phi_{\text{д}}$; $M_{\text{н}} > 0$.

$$\begin{cases} \sum \Delta U = C\Delta\Phi\omega_{\text{д}}; \\ \sum \Delta M = M_{\text{н}} - C\Delta\Phi i_{\Gamma}. \end{cases} \quad (34)$$

$$\sum \Delta M = M_{\text{н}} - C\Delta\Phi i_{\Gamma}. \quad (35)$$

CG: $\Phi_{\Gamma} > \Phi_{\text{д}}$; $\Delta\Phi = \Phi_{\Gamma} - \Phi_{\text{д}}$; $I_{\text{н}} > 0$.

$$\begin{cases} \sum \Delta U = C\Delta\Phi\omega_{\text{д}}; \\ \sum \Delta M = C\Phi I_{\text{н}} - C\Delta\Phi i_{\Gamma}. \end{cases} \quad (36)$$

$$\sum \Delta M = C\Phi I_{\text{н}} - C\Delta\Phi i_{\Gamma}. \quad (37)$$

DF: $K_\omega > 1$; $K_M < 1$; $M_{\text{н}} > 0$.

$$\begin{cases} \sum \Delta U = C\Phi\omega_{\text{д}}(K_\omega - 1); \\ \sum \Delta M = M_{\text{н}} - C\Phi i_{\Gamma}(1 - K_M). \end{cases} \quad (38)$$

$$\sum \Delta M = M_{\text{н}} - C\Phi i_{\Gamma}(1 - K_M). \quad (39)$$

DG: $K_\omega > 1$; $K_M < 1$; $I_{\text{н}} > 0$.

$$\begin{cases} \sum \Delta U = C\Phi\omega_{\text{д}}(K_\omega - 1); \\ \sum \Delta M = C\Phi I_{\text{н}} K_M - C\Phi i_{\Gamma}(1 - K_M). \end{cases} \quad (40)$$

$$\sum \Delta M = C\Phi I_{\text{н}} K_M - C\Phi i_{\Gamma}(1 - K_M). \quad (41)$$

EF: $K_U > 1$; $K_I < 1$; $M_{\text{н}} > 0$.

$$\begin{cases} \sum \Delta U = C\Phi\omega_{\text{д}}(K_U - 1); \\ \sum \Delta M = M_{\text{н}} - C\Phi i_{\Gamma}(1 - K_I). \end{cases} \quad (42)$$

$$\sum \Delta M = M_{\text{н}} - C\Phi i_{\Gamma}(1 - K_I). \quad (43)$$

$EG: K_U > 1; K_I < 1; I_{и} > 0.$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \Delta U = C\Phi\omega_{д} (K_U - 1); \\ \sum \Delta M = C\Phi I_{и} - C\Phi i_{г} (1 - K_I). \end{array} \right. \quad (44)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \Delta U = C\Phi\omega_{д} (K_U - 1); \\ \sum \Delta M = C\Phi I_{и} - C\Phi i_{г} (1 - K_I). \end{array} \right. \quad (45)$$

Полученные в результате анализа варианты условий взаимного нагружения тяговых электромашин могут быть использованы в качестве исходных данных при решении задачи выбора рациональных схем для их испытания.

Список литературы

1. Афанасов А. М. Электромеханические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока [Текст] / 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.
2. Афанасов А. М. Энергетические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 26. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – 34-38.
3. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин [Текст] / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.