

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Розглянуто умови забезпечення взаємного навантаження електричних машин постійного струму.

Рассмотрены условия обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока.

The conditions of providing the mutual loading of DC electric machines are considered.

Оптимизация структуры схемы взаимной нагрузки является генеральным направлением в решении общей задачи снижения энергетических затрат на испытание тяговых энергетических машин постоянного и пульсирующего тока.

Необходимым условием решения задачи выбора наиболее рационального варианта испытательной схемы является наличие систематизированного перечня всех принципиально возможных вариантов создания условий взаимной нагрузки.

Первым необходимым этапом такой систематизации является определение всех возможных вариантов энергетических соотношений в схеме взаимной нагрузки неопределенной структуры. Проведение такого анализа является возможным благодаря определенности принципа энергопередачи при взаимной нагрузке электромашин. Известными будем считать также и способы покрытия потерь в схеме взаимной нагрузки: электрический и механический.

На рис. 1 приведена универсальная схема преобразования мощностей в основном контуре схемы взаимной нагрузки неопределенной структуры. Данный контур включает в себя: электрические части двигателя ЭД и генератора ЭГ, механические части двигателя МД и генератора МГ, преобразователи электрической и механической мощностей ПЭ и ПМ соответственно, источники электрической и механической мощностей ИЭ и ИМ соответственно. Под электрическими частями двигателя и генератора ЭГ понимаются их обмотки, а под механическими частями МД и МГ – их роторы, вращающиеся в статорах. Электрическая часть двигателя является потребителем электрической мощности, а его механическая часть – источником механической мощности $P_{мд}$. Механическая часть генератора представляет собой потребитель механической мощности, а его

электрическая часть – источник электрической мощности $P_{эг}$. Соответствующие преобразования мощностей в двигателе и генераторе происходят через их электромагнитные мощности $P_{эмд}$ и $P_{эмг}$ соответственно.

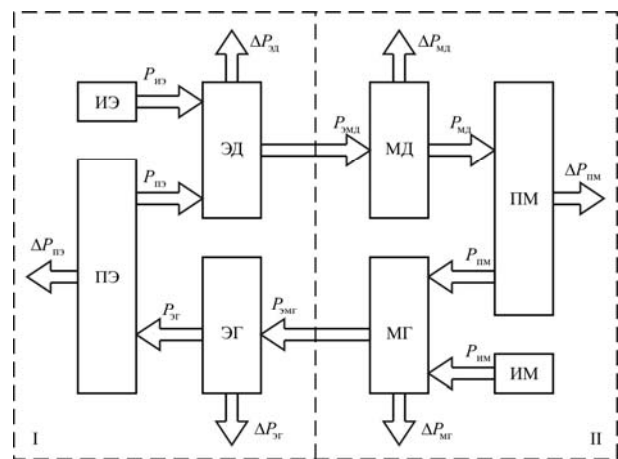


Рис. 1

Общая электрическая мощность $P_{эд}$, потребляемая двигателем, представляет собой сумму мощностей $P_{иэ}$ и $P_{пэ}$ источника ИЭ и преобразователя ПЭ соответственно. Общая механическая мощность, потребляемая генератором $P_{мг}$, представляет собой сумму мощностей $P_{им}$ и $P_{пм}$ источника ИМ и преобразователя ПМ соответственно.

$$P_{эд} = P_{пэ} + P_{иэ}; \quad (1)$$

$$P_{мг} = P_{пм} + P_{им}. \quad (2)$$

Мощности на выходах преобразователей ПЭ и ПМ:

$$P_{пэ} = P_{эг} - \Delta P_{пэ}, \quad (3)$$

где $\Delta P_{пэ}$ – потери мощности в преобразователе ПЭ;

$$P_{\text{пм}} = P_{\text{мд}} - \Delta P_{\text{пм}}, \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{пм}}$ – потери мощности в преобразователе ПМ;

При преобразовании мощностей неизбежны потери в электрических частях двигателя и генератора $\Delta P_{\text{эд}}$ и $\Delta P_{\text{эг}}$ (электрические потери) соответственно, а также потери в механических частях двигателя и генератора $\Delta P_{\text{мд}}$ и $\Delta P_{\text{мг}}$ (механические и магнитные потери) соответственно.

Электрические потери $\Delta P_{\text{эд}}$ и $\Delta P_{\text{эг}}$ вызваны протеканием токов в обмотках двигателя и генератора, а механические и магнитные потери $\Delta P_{\text{мд}}$ и $\Delta P_{\text{мг}}$ – вращением роторов испытуемых машин. На схеме преобразования мощностей отдельно не показаны добавочные потери двигателя и генератора, которые при рассмотрении вопроса их компенсации в схеме взаимной нагрузки можно частично отнести к электрическим, а частично – к магнитным. Отдельное рассмотрение этого вида потерь в данном анализе не является принципиально необходимым, а потому опускается.

Энергетическим критерием работоспособности схемы взаимной нагрузки является условие компенсации всех потерь в схеме внешними источниками мощности (ИЭ, ИМ).

Принципиально возможны следующие варианты компенсации потерь мощности в двигателе, генераторе и преобразователях:

- а) компенсация всех потерь одним источником электрической мощности;
- б) компенсация отдельных видов потерь двумя отдельными источниками электрической мощности;
- в) компенсация всех потерь одним источником механической мощности;
- г) компенсация отдельных видов потерь двумя отдельными источниками механической мощности;
- д) компенсация электрических потерь источником электрической мощности, а магнитных и механических – источником механической мощности;
- е) компенсация электрических потерь источником механической мощности, а механических и магнитных – источником электрической мощности.

Продолжая логическую цепь перебора вариантов сочетания видов потерь испытуемых электромашин с видами источников мощности, которыми можно компенсировать эти потери, придем к варианту, в котором все потери дви-

гателя компенсируются своими источниками энергии, а все потери генератора – своими. Однако даже поверхностный анализ схемы энергетических преобразований, приведенной на рис. 1, показывает, что такой вариант нерационален.

Замкнутый контур преобразования мощностей в схеме взаимной нагрузки (см. рис. 1) условно можно разбить на два участка, обведенные на рис. 1 пунктирными линиями. Участок I представляет собой электрическую часть стенда взаимной нагрузки, в которой происходят преобразования электрических мощностей. На этом участке схемы энергетических преобразований возникают только электрические потери, которые обусловлены активными падениями напряжений на элементах электрической цепи, вызванными протеканием токов. Компенсация этих потерь возможна только созданием в последовательной цепи электрических преобразований дополнительной электродвижущей силы. А в связи с тем, что цепь данных преобразований последовательная, создание дополнительных э.д.с. для отдельной компенсации электрических потерь двигателя и генератора нецелесообразно.

Участок II схемы на рис. 1 представляет собой механическую часть стенда взаимной нагрузки, в которой происходит последовательное преобразование механических мощностей. Отдельная компенсация механических и магнитных потерь двигателя и генератора двумя источниками момента, включенными в данную последовательную механическую цепь, нецелесообразна из тех же соображений, что и компенсация электрических потерь двумя источниками э.д.с.

Необходимо отметить, что каждому из возможных вариантов компенсации потерь (“а” – “е”) соответствует целый ряд вариантов схемы взаимной нагрузки. Таким образом, первым этапом в решении задачи оптимизации схемы взаимной нагрузки является выбор рационального варианта компенсации потерь из перечня, представленного выше. Приведем сравнительный анализ этих вариантов.

Взаимосвязь электромагнитных мощностей двигателя и генератора согласно схеме на рис. 1 может быть представлена в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} P_{\text{эмд}} = P_{\text{эмг}} - \Delta P_{\text{эг}} - \Delta P_{\text{пэ}} + P_{\text{иэ}} - \Delta P_{\text{эд}}; & (5) \\ P_{\text{эмг}} = P_{\text{эмд}} - \Delta P_{\text{мд}} - \Delta P_{\text{пм}} + P_{\text{им}} - \Delta P_{\text{мг}}. & (6) \end{cases}$$

Преобразовав данную систему, получим

$$P_{\text{эмд}} - P_{\text{эмг}} = \frac{1}{2}(P_{\text{из}} - P_{\text{им}}) - \frac{1}{2}(\Delta P_{\text{э}} - \Delta P_{\text{м}}), \quad (7)$$

где $\Delta P_{\text{э}}$ и $\Delta P_{\text{м}}$ – суммарные электрические, магнитные и механические потери обеих испытуемых машин и преобразователей.

$$\Delta P_{\text{э}} = \Delta P_{\text{эд}} + \Delta P_{\text{эг}} + \Delta P_{\text{из}}; \quad (8)$$

$$\Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{\text{мд}} + \Delta P_{\text{мг}} + \Delta P_{\text{им}}. \quad (9)$$

Рассмотрим все варианты компенсации потерь мощности в основном контуре схемы взаимной нагрузки (рис. 1).

Вариант «а». Все потери компенсируются одним источником электрической мощности:

$$\begin{cases} P_{\text{им}} = 0; & (10) \\ P_{\text{из}} = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{м}}. & (11) \end{cases}$$

Из уравнения (7) после преобразований получим взаимосвязь электромагнитных мощностей для данного варианта в виде:

$$P_{\text{эмд}} - P_{\text{эмг}} = \Delta P_{\text{м}}. \quad (12)$$

Таким образом, в данном варианте механические и магнитные потери в схеме компенсируются положительной разностью электромагнитных мощностей двигателя и генератора. Тогда условие обеспечения взаимной нагрузки можно выразить в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} P_{\text{эмд}} > P_{\text{эмг}}; & (13) \\ P_{\text{из}} > P_{\text{эмд}} - P_{\text{эмг}}. & (14) \end{cases}$$

Неравенство (13) является условием вращения якорей испытуемых электромашин, а неравенство (14) – условием протекания токов в их якорных обмотках.

Вариант «б». Все потери компенсируются двумя отдельными источниками электрической мощности, электрические потери – одним, а механические и магнитные – другим.

$$\begin{cases} P_{\text{им}} = 0; & (15) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{\text{из1}} = \Delta P_{\text{э}}; & (16) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{\text{из2}} = \Delta P_{\text{м}}. & (17) \end{cases}$$

Используя уравнение (7) для данного варианта, получим аналогичное выражению (12) для варианта «а» уравнение

$$P_{\text{эмд}} - \Delta P_{\text{эмг}} = \Delta P_{\text{м}}. \quad (18)$$

Так же, как и в «а», в данном варианте механические и магнитные потери компенсируются положительной разностью электромаг-

нитных мощностей двигателя и генератора. Условие обеспечения взаимной нагрузки электромашин будет иметь вид

$$\begin{cases} P_{\text{эмд}} > P_{\text{эмг}}; & (19) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{\text{из1}} > 0. & (20) \end{cases}$$

Здесь неравенство (19) является условием вращения якорей испытуемых электромашин, а неравенство (20) – условием протекания токов в их якорных обмотках.

Вариант «в». Все потери компенсируются одним источником механической мощности:

$$\begin{cases} P_{\text{из}} = 0; & (21) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{\text{им}} = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{м}}. & (22) \end{cases}$$

Из уравнения (7) получим выражение, связывающее электромагнитные мощности испытуемых двигателя и генератора в виде:

$$P_{\text{эмг}} - \Delta P_{\text{эмд}} = \Delta P_{\text{э}}. \quad (23)$$

В рассматриваемом варианте компенсация всех электрических потерь в схеме обеспечивается положительной разностью электромагнитных мощностей генератора и двигателя. Условие обеспечения взаимной нагрузки имеет вид

$$\begin{cases} P_{\text{эмг}} > P_{\text{эмд}}; & (24) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{\text{им}} > P_{\text{эмг}} - P_{\text{эмд}}. & (25) \end{cases}$$

Неравенство (24) является условием протекания токов в якорных обмотках двигателя и генератора, а неравенство (25) – условием вращения их якорей.

Вариант «г». Все потери компенсируются двумя отдельными источниками механической мощности, электрические потери – одним, а механические и магнитные – другим:

$$\begin{cases} P_{\text{из}} = 0; & (26) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{\text{им1}} = \Delta P_{\text{э}}; & (27) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{\text{им2}} = \Delta P_{\text{м}}. & (28) \end{cases}$$

Используя уравнение (7), получим для данного варианта выражение взаимосвязи электромагнитных мощностей генератора и двигателя, аналогичное варианту «в»

$$P_{\text{эмг}} - \Delta P_{\text{эмд}} = \Delta P_{\text{э}}. \quad (29)$$

Так же, как и в варианте «в», компенсацию электрических потерь в схеме обеспечивает положительная разность электромагнитных мощностей генератора и двигателя. Условие

обеспечения взаимной нагрузки электромашин будет иметь вид

$$\begin{cases} P_{\text{эмг}} > P_{\text{эмд}}; \\ P_{\text{им2}} > 0. \end{cases} \quad (30)$$

Неравенство (30) является условием протекания токов в якорных обмотках испытуемых электромашин, а неравенство (31) – условием вращения их якорей.

Вариант «д». Электрические потери компенсируются источником электрической мощности, а магнитные и механические – источником механической мощности:

$$\begin{cases} P_{\text{из}} = \Delta P_3; \\ P_{\text{им}} = \Delta P_m. \end{cases} \quad (32)$$

Из уравнения (7) для данного варианта получим выражение, определяющее соотношение электромагнитных мощностей испытуемых электромашин в виде

$$P_{\text{эмд}} = P_{\text{эмг}}. \quad (34)$$

Таким образом, компенсация электрических, магнитных и механических потерь в схеме при таком варианте осуществляется при равенстве электромагнитных мощностей двигателя и генератора. Условием обеспечением взаимной нагрузки электромашин будет система неравенств:

$$\begin{cases} P_{\text{из}} > 0; \\ P_{\text{им}} > 0. \end{cases} \quad (35)$$

Неравенство (35) является условием протекания токов в якорных обмотках испытуемых электромашин, а неравенство (36) – условием вращения их якорей.

Вариант «е». Электрические потери компенсируются источником механической мощности, а магнитные и механические потери – источником электрической мощности:

$$\begin{cases} P_{\text{им}} = \Delta P_3; \\ P_{\text{из}} = \Delta P_m. \end{cases} \quad (37)$$

Используя уравнение (7), получим выражение, определяющее соотношение электромагнитных мощностей испытуемых электромашин в виде

$$P_{\text{эмд}} - P_{\text{эмг}} = \Delta P_m - \Delta P_3. \quad (39)$$

При данном варианте компенсации потерь в схеме взаимной нагрузки разница между электромагнитными мощностями двигателя и гене-

ратора равна разности механических и электрических потерь. Это означает, что характер соотношения этих электромагнитных мощностей будет изменяться в зависимости от соотношения видов потерь в схеме. Условием обеспечения взаимной нагрузки электромашин при данном варианте будет система:

$$P_{\text{эмд}} = P_{\text{эмг}}, \text{ если } \Delta P_m = \Delta P_3; \quad (39)$$

$$P_{\text{эмд}} > P_{\text{эмг}}, \text{ если } \Delta P_m > \Delta P_3; \quad (40)$$

$$P_{\text{эмд}} < P_{\text{эмг}}, \text{ если } \Delta P_m < \Delta P_3; \quad (41)$$

$$P_{\text{из}} > 0; \quad (42)$$

$$P_{\text{им}} > 0. \quad (43)$$

Неравенство (40) является условием вращения якорей двигателя и генератора, а неравенство (41) – условием протекания в их обмотках тока. Неравенства (42), (43) являются дополнительными обязательными условиями, без которых невозможно обеспечение условий (40), (41). Уравнение (39) является частным случаем соотношения электромагнитных мощностей испытуемых электромашин, которое соответствует режиму равенства электрических потерь в схеме магнитным и механическим потерям. Для данного частного случая неравенства (42), (43) также являются необходимыми условиями работы схемы взаимной нагрузки.

Полученные соотношения электромагнитных мощностей испытуемых электромашин определяют характер возможных соотношений их токов, магнитных потоков и частот вращения, обеспечивающих процесс взаимной нагрузки.

Анализ этих условий обеспечения взаимной нагрузки, полученных для каждого из вариантов компенсации потерь, позволяет определить все принципиально возможные варианты схемы взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока.

В вариантах «а», «б» и «д» компенсация электрических потерь осуществляется непосредственно источником электрической мощности без преобразований в другой вид мощности.

В вариантах «в», «г», «д» компенсация магнитных и механических потерь осуществляется источником механической мощности, непосредственно и также без преобразований в другой вид мощности.

В вариантах «в», «г» и «е» компенсация электрических потерь осуществляется источником механической мощности ИМ путем преобразования её в электрическую посредством ис-

пытуемого генератора. При этом электромагнитная мощность генератора $P_{эмг}$ и потери в нем $\Delta P_{мг}$ и $\Delta P_{эг}$ увеличиваются.

В вариантах «а», «б» и «е» компенсация механических потерь осуществляется источником электрической мощности ИЭ путем преобразования её в механическую посредством испытуемого двигателя. При этом электромагнитная мощность двигателя $P_{эмд}$ и потери в нем $\Delta P_{эд}$ и $\Delta P_{мд}$ также увеличиваются.

Здесь необходимо отметить, что отмеченное выше увеличение потерь, связанное с необходимостью преобразования вида мощности, предназначенной для их покрытия, не оказыва-

ет отрицательного влияния на коэффициент полезного действия испытания, т.к. энергия покрытия всех потерь в самих испытуемых электромашинах в данном процессе является полезной. Отрицательным фактором при взаимной нагрузке в таких вариантах покрытия потерь является расхождение электромагнитных мощностей испытуемых электромашин, которые определяют степень их нагруженности. В табл. 1 приведены соотношения электромагнитных мощностей при взаимной нагрузке электромашин, полученные в результате анализа обобщенной схемы потоков мощности, представленной на рис. 1.

Таблица 1

Вариант		а, б	в, г	д	е
Способ покрытия потерь	$\Delta P_э$	ИЭ	ИМ	ИЭ	ИМ
	$\Delta P_м$	ИЭ	ИМ	ИМ	ИЭ
Соотношение электромагнитных мощностей		$P_{эмд} > P_{эмг}$	$P_{эмд} < P_{эмг}$	$P_{эмд} = P_{эмг}$	$P_{эмд} \approx P_{эмг}$
Недогруженная электромашина		Генератор	Двигатель	нет	Двигатель или генератор

Наиболее рациональным с точки зрения одинакового нагружения испытуемых электромашин является вариант «д», при котором электромагнитные мощности двигателя и генератора равны. Недогружение одной из однотипных испытуемых электромашин при испытании на нагрев не дает возможности определения действительного значения превышения температуры её частей, соответствующего номинальному режиму. Отметим, что испытания на нагрев являются наиболее энергоёмкими в общем перечне программы приемо-сдаточных испытаний.

При решении задачи оптимизации схемы взаимной нагрузки может оказаться, что с точки зрения минимума энергозатрат на испытания или себестоимости испытательной станции рациональным будет вариант, отличный от ва-

рианта «д». Для уменьшения отрицательного влияния фактора, описанного выше, необходимо выбирать такие методы обеспечения взаимной нагрузки, при которых разность тепловой нагруженности испытуемых электромашин будет минимальной при заданной разности их электромагнитных мощностей.

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.