

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКЕ ТЯГОВИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Наведено аналіз енергетичних потоків у схемах взаємного навантаження тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму.

Приведен анализ энергетических потоков в схемах взаимной нагрузки тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока.

The analysis of power streams in the schemes of mutual loading of hauling electric machines of direct and pulsating current is presented.

Очевидная необходимость модернизации существующих станций для испытания тяговых электрических машин ставит одним из важнейших – вопрос о том, какой из вариантов схем взаимной нагрузки будет наиболее рациональным для данного типа испытуемых машин. Даже поверхностный анализ параметров существующего типового ряда тяговых электромашин и известного количества вариантов схем взаимной нагрузки [1, 2] показывает, что данная проблема весьма актуальна и требует более глубокого исследования.

Одной из задач в решении проблемы выбора рациональных вариантов схем взаимной нагрузки является анализ энергетических потоков, обеспечивающих нормальное функционирование испытательного стенда. Проведение такого анализа принципиально возможно для любой испытательной системы, даже той, структура которой точно не определена, благодаря известной определенности самого принципа взаимной нагрузки электромашин.

С энергетической точки зрения этот принцип заключается в том, что электрическая энергия машины, работающей в режиме генератора, используется для питания машины, работающей в режиме двигателя и являющейся приводной для генератора, а все потери, возникающие при преобразовании мощности, компенсируются внешним источником энергии – сетью.

Здесь необходимо отметить, что этот принцип является общим для всех схем взаимной нагрузки только с энергетической точки зрения и никак не определяет конкретную структуру испытательного стенда, которая зависит от принятых способов обеспечения протекания тока в обмотках испытуемых электромашин и условий создания вращения их роторов. Это –

вопрос, требующий отдельного подробного анализа.

На рис. 1 приведена схема энергетических потоков, общая для всех вариантов схем взаимной нагрузки. Согласно данной схеме испытательный стенд включает в себя якорь электромашины-двигателя ЯД, якорь электромашины-генератора ЯГ, преобразователь механической мощности ПМ, преобразователь электрической мощности ПЭ, регулятор (источник) электрической мощности РЭ, регулятор (источник) механической мощности РМ, обмотка возбуждения двигателя ОВД, обмотка возбуждения генератора ОВГ, регулятор возбуждения двигателя РВД, РВГ, соответственно. Все регуляторы подключены к внешней сети С.

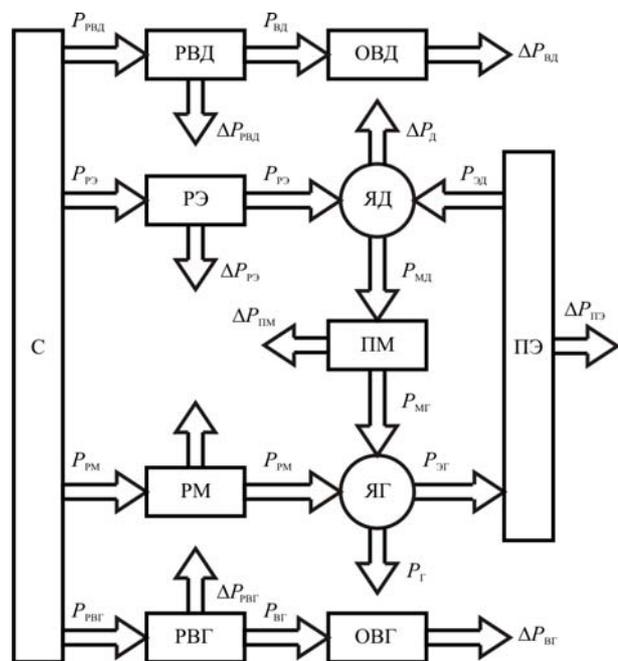


Рис. 1. Схема энергетических потоков в схеме взаимной нагрузки

Отметим, что приведенная схема энергетических потоков является общей для всех вариантов электромеханической схемы взаимной нагрузки. В этой энергетической схеме рассмотрены все возможные варианты создания условий работы испытательного стенда. В любом конкретном стенде могут отсутствовать многие из показанных преобразователей и регуляторов.

Что касается самого принципа взаимной нагрузки электрических машин, согласно схеме, приведенной на рис. 1, механическая мощность  $P_{\text{МД}}$  двигателя ЯД преобразуется с помощью преобразователя ПМ в механическую мощность  $P_{\text{МГ}}$  на валу генератора ЯГ. В генераторе механическая мощность  $P_{\text{МГ}}$  преобразуется в электрическую  $P_{\text{ЭГ}}$  и через преобразователь ПЭ в виде электрической мощности  $P_{\text{ЭД}}$  возвращается двигателю ЯД. В двигателе электрическая мощность  $P_{\text{ЭД}}$  преобразуется в механическую  $P_{\text{МД}}$ .

В данном замкнутом цикле преобразования энергии неизбежны потери мощности: в якорной цепи двигателя –  $\Delta P_{\text{Д}}$ , в якорной цепи генератора –  $\Delta P_{\text{Г}}$ , в преобразователях механической и электрической мощностей –  $\Delta P_{\text{ПМ}}$ ,  $\Delta P_{\text{ПЭ}}$  соответственно. Основным условием работы такой системы является полная компенсация всех потерь мощности в замкнутом цикле преобразования внешним источником энергии – сетью. Такая компенсация возможна путём передачи мощности из сети в замкнутую систему, описанную выше, двумя способами.

К первому способу относится передача мощности от сети к двигателю ЯД через регулятор электрической мощности РЭ. При этом к двигателю ЯД подводится дополнительная электрическая мощность  $P_{\text{РЭ}}$ .

Ко второму способу относится передача мощности от сети к генератору ЯД через регулятор механической мощности РМ. При этом к генератору подводится дополнительная механическая мощность  $P_{\text{ДМ}}$ .

В принципе, возможно как отдельное использование каждого из описанных способов компенсации потерь (электрического, механического), так и одновременное их использование. Наибольшее распространение, как известно, получил метод компенсации потерь в стенде с использованием двух преобразователей электрической мощности – вольтодобавочной

машины и линейного генератора. Достаточно распространено также и одновременное использование преобразователей механической и электрической мощностей – приводного дополнительного двигателя и вольтодобавочной машины.

Передача мощностей двигателю и генератору от сети через регуляторы РЭ и РМ связана с неизбежными потерями в них  $\Delta P_{\text{РЭ}}$  и  $\Delta P_{\text{РМ}}$  соответственно, которые также компенсируются сетью.

Нормальный процесс последовательного преобразования мощности в схеме невозможен без возбуждения двигателя и генератора. Согласно схеме на рис. 1, для возбуждения машин необходимы мощности  $P_{\text{ВД}}$  и  $P_{\text{ВГ}}$ , которые передаются от сети через регуляторы возбуждения РВД и РВГ. В данных регуляторах также неизбежны потери мощности  $\Delta P_{\text{РВД}}$  и  $\Delta P_{\text{РВГ}}$ , которые компенсируются сетью.

Мощности  $P_{\text{ВД}}$  и  $P_{\text{ВГ}}$  в системах возбуждения двигателя и генератора полностью преобразуются в потери  $\Delta P_{\text{ВД}}$  и  $\Delta P_{\text{ВГ}}$ .

Процессы преобразования энергии (мощности) в замкнутом контуре, включающем испытуемые машины, преобразователи и регуляторы, могут быть описаны математически в виде следующих уравнений баланса:

$$P_{\text{МД}} = P_{\text{ЭД}} + P_{\text{ДЭ}} - \Delta P_{\text{Д}}; \quad (1)$$

$$P_{\text{ЭГ}} = P_{\text{МГ}} + P_{\text{РМ}} - \Delta P_{\text{Г}}; \quad (2)$$

$$P_{\text{МГ}} = P_{\text{МД}} - \Delta P_{\text{ПМ}}; \quad (3)$$

$$P_{\text{ЭД}} = P_{\text{ЭГ}} - \Delta P_{\text{ПЭ}}. \quad (4)$$

Необходимым условием установившегося режима работы схемы взаимной нагрузки с энергетической точки зрения является система уравнений:

$$\begin{cases} \sum P_{\text{Р}} > 0; \\ \sum P_{\text{Р}} = \sum \Delta P_{\text{ДГ}} + \sum \Delta P_{\text{П}}; \\ P_{\text{ВД}} > 0; \\ P_{\text{ВГ}} > 0. \end{cases} \quad (5)$$

где  $\sum P_{\text{Р}}$  – суммарная мощность на выходах регуляторов РЭ и РМ;  $\sum \Delta P_{\text{ДГ}}$  – суммарная мощность потерь в якорных цепях испытуемых двигателя и генератора;  $\sum \Delta P_{\text{П}}$  – суммарная мощность потерь в преобразователях ПЭ и ПМ.

$$\sum P_p = P_{pЭ} + P_{pМ}; \quad (6)$$

$$\sum \Delta P_{дг} = \Delta P_{д} + \Delta P_{г}; \quad (7)$$

$$\sum \Delta P_{п} = \Delta P_{пМ} + \Delta P_{пЭ}. \quad (8)$$

К неустановившимся (переходным) режимам работы схемы взаимной нагрузки относятся режимы, отвечающие условиям:

$$\sum P_p > \sum \Delta P_{дг} + \sum \Delta P_{п}; \quad (9)$$

$$\sum P_p < \sum \Delta P_{дг} + \sum \Delta P_{п}. \quad (10)$$

Небалансная мощность при этом равна

$$P_{нб} = \sum P_p - \sum \Delta P_{дг} - \sum \Delta P_{п}. \quad (11)$$

И уравнивается эта небалансная мощность изменением общей собственной энергии  $W_c$  всех устройств, входящих в основной контур схемы

$$P_{нб} = \frac{dW_c}{dt}. \quad (12)$$

Под общей собственной энергией станда будем понимать сумму кинетической  $W_k$  и электромагнитной  $W_{эм}$  энергий испытуемых электромашин и преобразователей ПМ и ПЭ

$$W_c = W_k + W_{эм}; \quad (13)$$

$$W_k = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{J_i \omega_i^2}{2}, \quad (14)$$

где  $J_i$  – эквивалентный момент инерции  $i$ -го вращающегося элемента основного контура;  $\omega_i$  – угловая скорость  $i$ -го вращающегося элемента основного контура;

$$W_{эм} = \sum_{j=1}^{j=m} \frac{L_j i_j^2}{2}, \quad (15)$$

$L_j$  – индуктивность  $j$ -го элемента электрической цепи основного контура;  $i_j$  – сила тока  $j$ -го элемента электрической цепи основного контура.

Объединив (12) – (15), получим уравнение динамического равновесия мощностей в виде

$$P_{нб} = \sum_{i=1}^{i=n} J_i \cdot \omega_i \frac{d\omega_i}{dt} + \sum_{j=1}^{j=m} L_j \cdot i_j \frac{di_j}{dt}. \quad (16)$$

Несмотря на то, что кинетическая энергия вращающихся на стенде испытуемых электри-

ческих машин на несколько порядков больше электромагнитной энергии, накопленной в индуктивных элементах схемы, мгновенные значения мощностей, соответствующие изменениям этих энергий во времени, могут быть соизмеримы. Соотношение этих мощностей будет определяться, в том числе, и характером взаимосвязи между угловой скоростью вращения якорей испытуемых электромашин и сил токов в их обмотках. Необходимо отметить, что здесь имеются в виду не сами электромеханические характеристики испытуемых машин, а причинно-следственные связи упомянутых параметров. Эти связи между угловой скоростью и токами обмоток электромашин будут определяться выбранным вариантом схемы взаимной нагрузки. Анализ характера этих связей для различных вариантов схемы взаимной нагрузки очень важен для определения пределов устойчивости всей системы и выбора метода автоматического регулирования ею, а потому является предметом отдельного подробного исследования.

Возвращаясь к анализу энергетических соотношений в схеме взаимной нагрузки, заметим, что регуляторы электрической и механической мощностей РЭ и РМ должны быть рассчитаны с учётом составляющих небалансной мощности  $P_{нб}$ , входящих в неё в соответствии с уравнением (16). В противном случае, они будут перегружены в течение времени переходных процессов в механической и электрической частях станда.

Окончание же указанных переходных процессов будет характеризоваться уравнениями (5) нового статического равновесия или

$$P_{нб} = 0.$$

Это равновесие может наступить только в том случае, если увеличение подведенной к схеме взаимной нагрузки мощности  $\sum P_p$  приводит к росту потерь  $\sum \Delta P_{дг}$  и  $\sum \Delta P_{п}$ , которые она компенсирует, и наоборот. Это является энергетическим критерием устойчивости работы любого варианта схемы взаимной нагрузки. Причем, если в схеме разные виды потерь компенсируются различными регуляторами (источниками) мощности, то это условие должно соблюдаться для каждого отдельного вида потерь и регулятора (источника), который этот вид потерь компенсирует.

Этот принцип в первую очередь должен учитываться при выборе приоритетов в алгоритмах автоматического управления схемами

взаимной нагрузки, которые имеют узкий диапазон электромеханической устойчивости или вообще не устойчивы.

Здесь важно отметить, что внедрение систем автоматического управления работой схемы взаимной нагрузки позволяет при оптимизации её структуры рассматривать даже те варианты, которые при ручном управлении абсолютно неустойчивы.

Рассмотрим схему, приведенную на рис. 1, с точки зрения обеспечения возможности испытания по методу взаимной нагрузки электрических машин различных типов.

При испытании разнотипных машин даже одинаковой мощности, но отличающихся по номинальным значениям частоты вращения и напряжения (тока), наличие преобразователей ПМ и ПЭ является необходимым условием работы схемы.

В случае испытания по методу взаимной нагрузки двух машин, различающихся по номинальной мощности, в схеме необходимы дополнительные устройства отбора избыточной мощности. Исключением являются испытания, при которых электрическая машина большей номинальной мощности нагружается до номинальной мощности менее мощной машины.

С энергетической точки зрения возможно проведение испытаний более двух электрических машин в случае соблюдения условия

$$\sum P_{\text{нд}} \approx \sum P_{\text{нг}}, \quad (17)$$

где  $\sum P_{\text{нд}}$  – суммарная номинальная мощность электромашин, работающих в режиме двигателя;  $\sum P_{\text{нг}}$  – суммарная номинальная мощность электромашин, работающих в режиме генератора.

При проведении таких испытаний номинальные значения частот вращения, напряжений и токов электрических машин должны быть обеспечены соответствующей работой преобразователей механической и электрической мощности.

Энергоёмкость испытаний электромашин может быть оценена длительностью испытаний и суммарной мощностью, потребляемой из сети

$$P_{\text{с}} = \sum \Delta P_{\text{дг}} + \sum \Delta P_{\text{п}} + \sum \Delta P_{\text{р}} + \sum \Delta P_{\text{в}},$$

где  $\sum \Delta P_{\text{р}}$  – суммарная мощность потерь в регуляторах;  $\sum \Delta P_{\text{в}}$  – суммарная мощность потерь в системах возбуждения испытуемых машин.

$$\sum \Delta P_{\text{р}} = \Delta P_{\text{рЭ}} + \Delta P_{\text{рМ}} + \Delta P_{\text{рВД}} + \Delta P_{\text{рВГ}};$$

$$\Delta P_{\text{в}} = \Delta P_{\text{вД}} + \Delta P_{\text{вТ}}.$$

Необходимо отметить, что сумма ( $\sum \Delta P_{\text{дг}} + \sum \Delta P_{\text{в}}$ ) является полезной мощностью, затрачиваемой на проведение испытаний. Это те потери, которые не зависят, или, по крайней мере, не должны зависеть ни от структуры испытательного стенда, ни от характеристик источников, регуляторов, преобразователей и других устройств, входящих в стенд.

Более того, условия проведения испытаний должны обеспечивать полное соответствие характера потерь мощности в электромашинах при испытаниях условиям реальной их эксплуатации.

Суммарные потери мощности в преобразователях и регуляторах ( $\sum \Delta P_{\text{п}} + \sum \Delta P_{\text{р}}$ ) являются потерями, связанными с обеспечением испытаний, и должны быть минимизированы путем оптимизации структуры схемы взаимной нагрузки и выбора рациональных вариантов устройства преобразователей и регуляторов мощности.

Таким образом, коэффициент полезного действия, как процесса, целью которого является определение необходимых характеристик и параметров испытуемых электрических машин, может быть определен в виде

$$\eta = \frac{\sum P_{\text{дг}} + \sum P_{\text{в}}}{P_{\text{с}}}. \quad (18)$$

Оставив открытым вопрос о точном определении критериев оптимизации структуры схемы для испытания тяговых электрических машин, отметим, что минимизация себестоимости испытательного стенда и потерь  $\sum \Delta P_{\text{п}}$ ,  $\sum \Delta P_{\text{р}}$ , связанных с обеспечением испытаний, является основным направлением в решении общей задачи оптимизации.

Судя из схемы на рис. 1, такая минимизация может быть достигнута за счёт уменьшения числа последовательных преобразований энергии во вспомогательных устройствах или отказа от таких преобразований.

Наиболее рациональным, по-видимому, будет решение о компенсации всех потерь одним источником энергии. Это может быть как источник электрической мощности, подведенной к двигателю, так и источник механической мощности, подведенной к генератору.

Очевидным является рациональность включения обмоток возбуждения испытуемых электрических машин последовательного возбуждения, какими являются тяговые электромашинны, последовательно с их якорными цепями. При этом регуляторы возбуждения, если в них возникает необходимость, не должны представлять собой источники энергии. Т.е., необходимо отказаться от подпитки обмоток возбуждения, а использовать только их шунтирование, которое не вызывает дополнительных потерь мощности.

По возможности необходимо отказаться от преобразователей ПЭ и ПМ, в которых потери энергии, учитывая то, что они должны быть рассчитаны на максимальную мощность одной электрической машины, наибольшие. При ис-

пытании однотипных электрических машин это, как правило, легко достижимо.

Выполнение этих общих требований при выборе варианта схемы взаимной нагрузки является необходимым условием достижения высокой экономической эффективности от модернизации существующих станций для испытания тяговых электрических машин.

#### 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 24.12.2008.