

Из табл. 1 видно, что с увеличением R_0 в пределах $0 \leq R_0 \leq R_{0н}$ (для исследуемого типа преобразователя $R_{0н} = 0,75$ Ом) уменьшается колебательность процессов, снижаются броски пусковых и тормозных моментов. В то же время за счет более плавного характера изменения $M_э$ (увеличение его среднего значения) сокращается время пуска и торможения электропривода.

В расчетах использованы каталожные данные Т-образной схемы замещения АД 4А180М4У3: $R_s = 0,132$ Ом; $R_r = 0,0690$ Ом; $L_s = 0,045$ Гн; $L_r = 0,04563$ Гн; $L_m = 0,04423$ Гн; суммарный момент инерции привода составляет 1,5 момента инерции двигателя. Для расчетов были также использованы данные серийно выпускаемого преобразователя ЭКТ.

Применение математической модели инвертора переменной структуры позволяет учитывать характер электромагнитных процессов в элементах инвертора, что особенно важно в переходных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Структуры систем управления автоматизированными электроприводами/О.П.Ильин, В.И.Панасюк, Ю.Н.Петренко, В.П.Беляев. – Минск, 1978. – 367 с. 2. Ильин О.П., Петренко Ю.Н., Панфилов В.Н. Построение цифровой модели частотного электропривода. – В кн.: Электротехническая промышленность. Электропривод. М., 1981, № 5, с. 1–4. 3. Василевский А.М., Петренко Ю.Н. Исследование на ЦВМ пуско-тормозных режимов частотного электропривода. – В кн.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск, вып. 11, 1984, с. 96–99.

УДК 62.83.621.9

Л.С.ПИСАРИК, канд.техн.наук,
М.Б.СИЯЗОВ, БРИКИ СМАИН (БПИ)

СХЕМЫ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

При испытаниях электродвигателя по методу взаимной нагрузки он механически соединяется с нагружающей машиной, составляя с ней двухмашинный агрегат. Якорные цепи машин подключаются к источнику питания, причем схемы подключения могут быть различными.

Произведем сравнительный анализ этих схем. Для общности будем оперировать относительными единицами, приняв за базовые номинальные значения параметров двигателя $U_n, I_n, \Phi_n, \omega_0$ (для двигателей независимого и смешанного возбуждения), ω_n значение, граничное для двигателей последовательного возбуждения. Параметры агрегата во всех рассматриваемых далее схемах постоянны: сопротивление якорной цепи каждой машины $\rho = 0,051$, момент собственных потерь агрегата $\mu_0 = 2 \cdot 0,085 = 0,17$. Эти значения являются усредненными для машин независимого возбуждения серии П четырехполюсного исполнения в диапазоне мощностей 11–100 кВт. В агрегате с машинами последовательного возбуждения сопротивление якоря равно половине сопротивления якорной цепи.

При параллельном подключении агрегата к источнику (рис.1) статика схемы описывается следующими уравнениями (записаны для агрегата из двух

одинаковых двигателей независимого возбуждения при сопротивлении источника $R_{и} = 0$):

$$u = \varphi_1 \nu + \rho i_1 ;$$

$$u = \varphi_2 \nu + \rho i_2 ;$$

$$i_1 \varphi_1 + i_2 \varphi_2 - \mu_0 = 0. \quad (1)$$

Положительными направлениями токов и моментов будем считать направления, соответствующие двигательному режиму электрических машин в схеме. Из (1) получены выражения

$$i_1 = \frac{\mu_0 \rho \varphi_1 + u_{и} \varphi_2 (\varphi_2 - \varphi_1)}{\rho (\varphi_1^2 + \varphi_2^2)} ;$$

$$i_2 = \frac{\mu_0 \rho \varphi_2 - u_{и} \varphi_1 (\varphi_2 - \varphi_1)}{\rho (\varphi_1^2 + \varphi_2^2)} ;$$

$$i_{и} = \frac{\mu_0 \rho (\varphi_1 + \varphi_2) + u_{и} (\varphi_2 - \varphi_1)^2}{\rho (\varphi_1^2 + \varphi_2^2)} ;$$

$$\nu = \frac{u_{и} (\varphi_1 + \varphi_2)}{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} - \frac{\mu_0 \rho}{\varphi_1^2 - \varphi_2^2} .$$

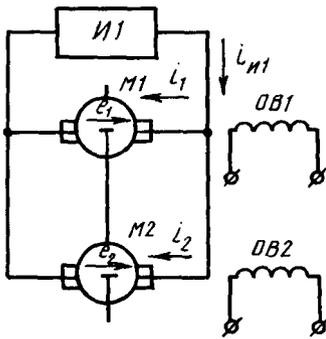


Рис. 1. Схема взаимного нагружения с двигателями независимого возбуждения и параллельным источником.

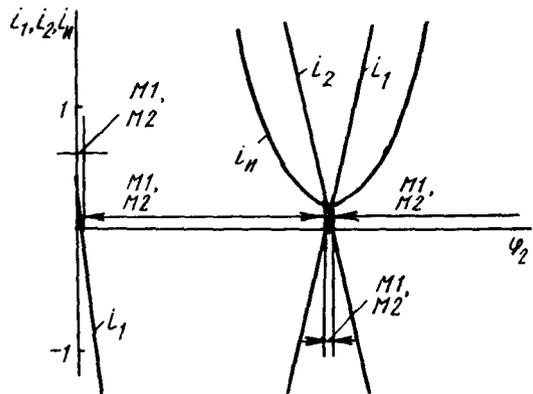


Рис. 2. Характеристики схемы рис. 1.

На рис. 2 представлены зависимости токов машин и источника, а также скорости агрегата для схемы рис. 1 от магнитного потока φ_2 нагружающей машины M2 при испытании двигателя M1 ($\varphi_1 = 1$).

Из рис. 2 видно, что разным значениям φ_2 соответствуют различные режимы работы машин агрегата. Поскольку напряжение на зажимах двигателя М1 неизменно и $\varphi_1 = 1$, то скорость двигателя (агрегата) определяется якорным током i_1 по электромеханической характеристике двигателя. Режим взаимного нагружения, когда двигатель М1 нагружен номинальным током $i_1 = 1$, имеет место при $\varphi_2 = 1,094$. В этом режиме $i_2 = 0,754$, $i_{н1} = 0,246$ и мощность $P_{н1}$, потребляемая агрегатом от источника, составляет 0,246 от номинальной первичной мощности двигателя М1. Для создания потока $\varphi_2 = 1,094$ ток возбуждения машины М2 должен составить 1,5 его номинала, т.е. обмотка возбуждения должна быть перегружена. Перегрузка обмотки возбуждения нагружающей машины на рис. 1, неизбежная при обеспечении номинальной нагрузки испытуемого двигателя, ограничивает применение этой схемы с агрегатом из одинаковых машин.

Схема взаимного нагружения с двумя источниками (рис. 3) позволяет избежать перегрузки обмотки возбуждения нагружающей машины. Этой схеме соответствуют уравнения (при $R_{н1} = R_{н2} = 0$):

$$\begin{aligned} u_{н1} &= \varphi_1 \nu + i_1 \rho; \\ u_{н1} &= \varphi_2 \nu + i_2 \rho + u_{н2}; \\ i_1 \varphi_1 + i_2 \varphi_2 - \mu_0 &= 0, \end{aligned}$$

из которых получены выражения:

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{u_{н1}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2) - u_{н1}\varphi_1(\varphi_1 + \varphi_2) + u_{н2}\varphi_1\varphi_2 + \varphi_1\rho\mu_0}{\rho(\varphi_1^2 + \varphi_2^2)}; \\ i_2 &= \frac{u_{н1}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2) - u_{н1}\varphi_2(\varphi_1 + \varphi_2) + u_{н2}\varphi_2^2 + \varphi_2\rho\mu_0 - u_{н2}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2)}{\rho(\varphi_1^2 + \varphi_2^2)}; \\ i_{н1} &= \frac{2u_{н1}}{\rho} - \frac{u_{н1}(\varphi_1 + \varphi_2)^2}{\rho(\varphi_1^2 + \varphi_2^2)} + \frac{u_{н2}(\varphi_1\varphi_2 + \varphi_2^2)}{\rho(\varphi_1^2 + \varphi_2^2)} + \frac{\mu_0(\varphi_1 + \varphi_2)}{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} - \frac{u_{н2}}{\rho}; \\ \nu &= \frac{u_{н1}(\varphi_1 + \varphi_2) - u_{н2}\varphi_2 - \rho\mu_0}{\varphi_1^2 + \varphi_2^2}. \end{aligned}$$

При испытании двигателя по схеме, изображенной на рис. 3, его ток нагрузки изменяют, изменяя напряжение $u_{н2}$ последовательного источника И2. Зависимости i_1 , i_2 , $u_{н1}$, ν от $u_{н2}$ при $\varphi_1 = \varphi_2 = 1$ приведены на рис. 4. Как видно, изменение $u_{н2}$ по значению и знаку также изменяет режимы работы машин агрегата. При $u_{н2} = 0,0933$ двигатель М1 нагружается номинальным током и от параллельного источника И1 потребляется ток $i_{н1} = 0,17$. Суммарная мощность, потребляемая агрегатом от источников, равна 0,246, т.е. она равна мощности для схемы 1.

При $u_{н2}$ более 0,0933 ток $i_{н1}$ уменьшается, обращаясь в ноль при $u_{н2} = 2u_{н1} + \rho\mu_0$. При таком режиме энергия подводится к агрегату только от последовательного источника. Когда $u_{н2} > 2u_{н1} + \rho\mu_0$, схема работает по принципу схемы с одним последовательным источником, описываемой ниже.

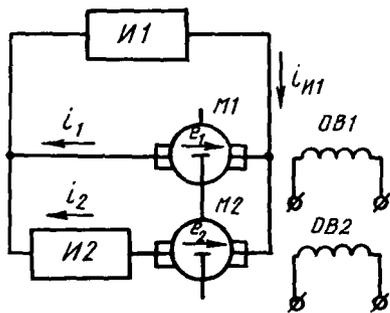


Рис. 3. Схема взаимного нагружения с двигателями независимого возбуждения с двумя источниками.

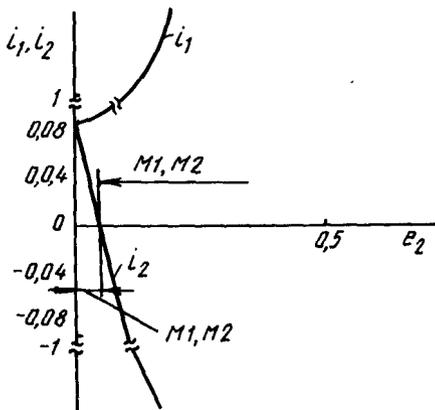


Рис. 4. Характеристики схемы рис. 3.

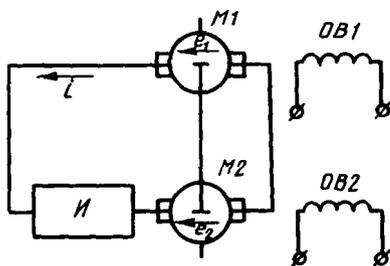


Рис. 5. Схема взаимного нагружения с двигателями независимого возбуждения с последовательным источником.

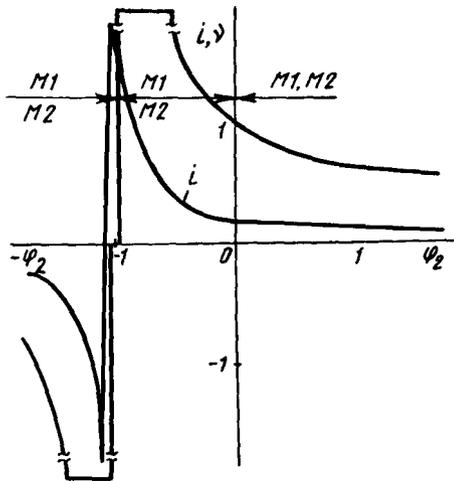


Рис. 6. Характеристики схемы рис. 5.

Схема с одним источником, к которому подключены последовательно соединенные якорные цепи машин агрегата (рис. 5), описывается уравнениями:

$$u = \varphi_1 v + \varphi_2 v + i 2\rho ;$$

$$i\varphi_1 + i\varphi_2 - \mu_0 = 0 ,$$

откуда

$$i = \frac{\mu_0}{\varphi_1 + \varphi_2} ;$$

$$v = \frac{u}{\varphi_1 + \varphi_2} - \mu_0 \frac{2\rho}{(\varphi_1 + \varphi_2)^2}.$$

Зависимости i и v от φ_2 при $\varphi_1 = 1$ представлены на рис. 6. При одинаковых направлениях потоков φ_1 и φ_2 агрегат работает в режиме двухдвигательного привода без внешнего момента сопротивления. При встречном направлении потока φ_2 имеет место взаимное токонагружение машин, причем при $\varphi_2 \leq 0,983$ в режиме двигателя находится М1, а при $\varphi_2 \geq 1,017$ — М2. Когда модуль потока φ_2 находится в интервале между 0,983 и 1,017, агрегат неподвижен, и по цепи якорей течет ток, ограничиваемый лишь сопротивлением цепи. Увеличение φ_2 сверх 1,017 реверсирует агрегат.

Поскольку напряжение на двигателе в данной схеме при различных значениях φ_2 разное, то скорость двигателя (агрегата) в зависимости от φ_2 изменяется по сложной кривой в широких пределах. Для обеспечения номинального режима двигателя в схеме нужно установить функционально связанные значения напряжения источника u и потока φ_2 : для рассматриваемого агрегата это $u = 0,263$, $\varphi_2 = 0,83$. Мощность, потребляемая агрегатом от источника, равна в этом режиме 0,263, что несколько выше, чем в предыдущих схемах (0,246), так как здесь и по якорю М2 протекает ток $i = 1$.

Сопоставление трех приведенных схем показывает, что номинальный режим двигателя независимого возбуждения может быть обеспечен продолжительно нагружением в схеме с двумя источниками и в схеме с одним последовательным источником. Во втором случае агрегат потребляет мощность, на 6,9 % большую, чем в первом.

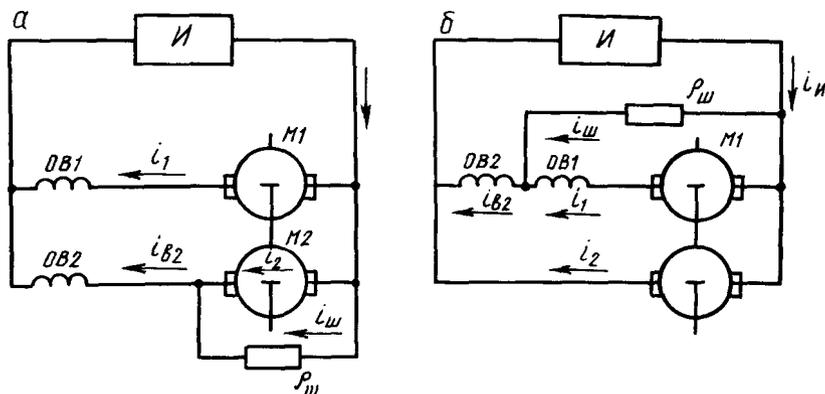


Рис.7. Схемы взаимного нагружения с двигателями последовательного возбуждения и параллельным источником при шунтировании якоря генератора (а) и шунтировании двигателя (б).

Схемы взаимного нагружения с двигателями последовательного возбуждения рассмотрим приближенно, считая линейными зависимости потоков от токов возбуждения машин.

Чтобы ввести нагружающую машину последовательного возбуждения в генераторный режим, нужно выполнить любое из двух условий.

1. Сформировать у нее механическую характеристику с допустимой скоростью ω_0 идеального холостого хода и обеспечить работу агрегата со скоростью более высокой, чем ω_0 .

2. Приложить к валу внешний момент, направленный против двигательного электромагнитного момента машины, и обеспечить превышение внешнего момента над ним.

Первое условие реализуется в двух схемах: с параллельным источником и с двумя источниками, второе — в схемах с последовательным источником.

В схемах с параллельным подключением машин к источнику (рис. 7) двигатель М1 нагружается генератором М2 при усилении поля генератора путем шунтирования якоря М2 (рис. 7, а) или двигателя М1 (рис. 7, б). Схемы описываются следующими системами уравнения:

для схемы рис. 7, а:

$$\begin{aligned} u &= i_1 v + i_1 \rho ; \\ u &= i_{B2} v + i_2 \cdot 0,5 \rho + i_{B2} \cdot 0,5 \rho ; \\ i_{B2} v + i_2 \cdot 0,5 \rho &= i_{ш} \rho_{ш} ; \\ i_{ш} + i_2 &= i_{B2} ; \\ i_1^2 + i_2 \cdot i_{B2} - \mu_0 &= 0 ; \end{aligned}$$

для схемы рис. 7, б:

$$\begin{aligned} u &= i_{B2} v + i_2 \cdot 0,5 \rho ; \\ u &= i_1 v + i_1 \rho + i_{B2} \cdot 0,5 \rho ; \\ i_1 v + i_1 \rho &= i_{ш} \rho_{ш} ; \\ i_1 v + i_1 \rho &= i_{ш} \rho_{ш} ; \\ i_{ш} + i_1 &= i_{B2} ; \\ i_1^2 + i_2 \cdot i_{B2} - \mu_0 &= 0 . \end{aligned}$$

Решив эти системы уравнений, можно найти значения $\rho_{ш}$, при которых обеспечивается нагружение испытуемого двигателя током $i_1 = 1$. Однако получить необходимое усиление потока генератора нельзя из-за явления насыщения магнитопровода машины. Поэтому практическое применение данных схем ограничено.

При двух источниках схемы приведены на рис. 8 и 9. Здесь, как и в схеме на рис. 3, ток двигателя М1 изменяется с изменением напряжения последовательного источника И2.

Из уравнений схемы на рис. 8 запишем:

$$\begin{aligned} u_1 &= v i_1 + i_1 \rho ; \\ u_1 &= v i_2 + i_2 \rho + u_2 ; \\ i_1^2 + i_2^2 - \mu_0 &= 0 . \end{aligned}$$

При $R_{и1} = R_{и2} = 0$ получаем выражение для тока двигателя М1:

$$i_1 = u_1 \sqrt{\frac{\mu_0}{2u_1^2 - 2u_1u_2 + u_2^2}}$$

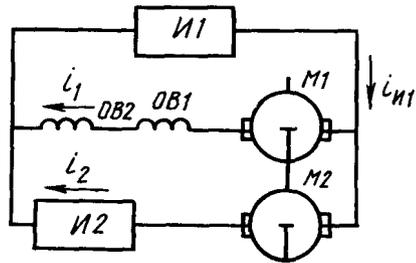
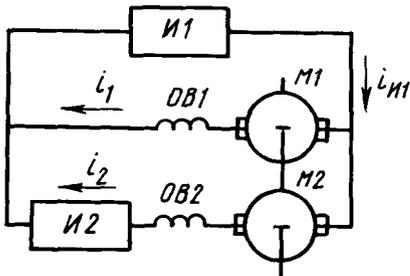


Рис. 8. Схема взаимного нагружения с двигателями последовательного возбуждения с двумя источниками.

Рис. 9. Схема взаимного нагружения с двигателями последовательного возбуждения с двумя источниками и обмотками возбуждения машин в цепи двигателя.

Из него следует, что для обеспечения номинального режима М1 ($u_1 = 1, i_1 = 1$) напряжение u_2 должно быть

$$u_2 = 1 \pm \sqrt{\mu_0 - 1} .$$

Как видно, указанный режим получить невозможно, так как $\mu_0 < 1$.

На рис. 9, который описывают уравнения

$$\begin{aligned} u_1 &= v i_1 + i_1 \cdot 1,5\rho ; \\ u_1 &= v i_1 + u_2 + i_2 \cdot 0,5\rho ; \\ i_1^2 + i_1 \cdot i_2 - \mu_0 &= 0 , \end{aligned}$$

ток двигателя М1

$$i_1 = \frac{u_2}{4\rho} \pm \sqrt{\frac{u_2^2 + 4\mu_0\rho^2}{16\rho^2}}$$

и условие получения номинального режима М1 ($u_{М1} = 1, i_1 = 1$) составят

$$\begin{aligned} u_1 &= 1 + 0,5\rho ; \\ u_2 &= \rho \sqrt{0,25\mu_0^2 - 2\mu_0 + 4} . \end{aligned}$$

Как видно, рис. 8 и 9 принципиально различны: в первом режим взаимной нагрузки невозможен, второй его обеспечивает. Причина различия в том, что изменение направления тока i_2 , достигаемое увеличением u_2 , не изменяет знака μ_2 в первой схеме, т.е. М2 – всегда двигатель, а во второй М2 переходит в генераторный режим.

Схемы с последовательным включением источника приведены на рис.10 и 11. Они позволяют нагрузить двигатель М1 за счет введения М2 в режим противовключения.

Переход двухмашинного агрегата из двигательного в режим взаимной нагрузки происходит при таких воздействиях на машины, которые вызывают расхождение точек идеального холостого хода их механических характеристик или вводят нагружающую машину в режим противовключения.

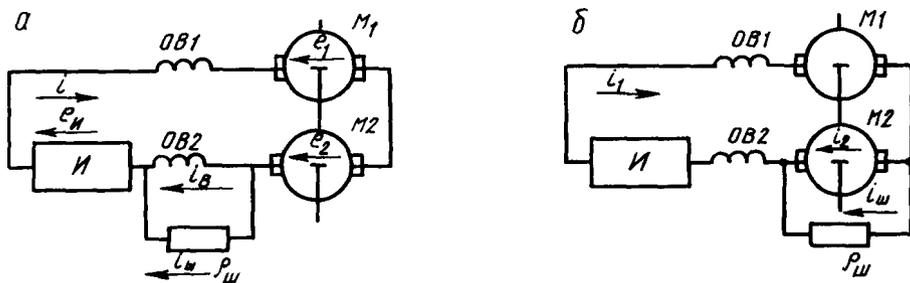


Рис. 10. Схема взаимного нагружения с двигателями последовательного возбуждения с последовательным источником и шунтированием обмотки возбуждения генератора (а); якоря генератора (б).

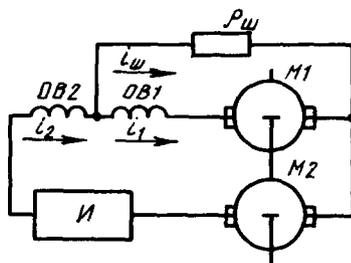


Рис. 11. Схема взаимного нагружения с двигателями последовательного возбуждения и последовательным источником при шунтировании двигателя.

При параллельном включении источника нагружающая машина работает в режиме генераторной рекуперации, который характеризуется увеличением магнитного потока сверх номинального, в схемах с последовательным включением источника она работает в режиме противовключения с потоком, меньшим номинального. В схемах с двумя источниками поток нагружающей машины может быть номинальным, и изменение нагрузки двигателя осуществляется изменением эдс последовательного источника.

Выбор конкретной схемы нагружения испытываемой машины определяется требованиями к режимам испытаний.