Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCIV , 1982 г.

УДК 621.313.333:622

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ

В.В.РУДАКОВ, Р.П.МАРТИКАЙНЕН, Г.В.ОРАНСКИЙ

В настоящее время широкое распространение получили два типа электромеханических стендов[x]: нагрузочные стенды для испытания электродвигателей и механического оборудования в условиях нагружения, максимально приближенного к натурной нагрузке; воспроизводящие стенды для испытаний натурных систем управления и регуляторов, сопряженных с электромеханической моделью, воспроизводящей с высокой степенью приближения параметры и характеристики натурной силовой электромеханической, гидромеханической или другой системы. Нагрузочные электромеханические стенды позволяют существенно повысить качество испытаний электродвигателей и механического оборудования на заводах и в ремонтных цехах предприятий, за счет чего снизить выход их из строя при эксплуатации. Воспроизводящие электромеханические стенды позволяют в лабораторных или цеховых условиях воспроизводить самые разнообразные критические режимы установок, в которых отрабатывают и налаживают сложные системы автоматического управления и регулирования. Эти стенды дают возможность полностью исключить плохую работу автоматики в критических и аварийных ситуациях, а также существенно сократить сроки доводочных работ при создании новых систем автоматики и перевести на стенды основные работы по наладке при введении систем управления и регулирования в эксплуатацию.

Нагрузочные стенды должны позволять воспроизводить механический момент нагрузки на испытуемом двигателе с требуемой функциональной зависимостью его от скорости или от времени. Условия подобия в этом случае определяются соотношением

$$\frac{M_c\left(\frac{\omega}{\omega_н}\right)^y}{M_м} = idem,$$

[x] Электродинамическая модель для исследования систем автоматики электроприводов / В.В.Рудаков, В.Н.Мамедов, Б.А.Егоров, О.Д.Власова. – Вестник электропромышленности, 1960, № 9.

где $M_c\left(\frac{\omega}{\omega_н}\right)^7$ - приведенный к валу двигателя натурный момент нагрузки машины; $M_м$ - момент нагрузочной машины стенда.

Реализация этого критерия подобия позволяет с высокой степенью точности воспроизводить на стенде условия статического нагружения испытуемого двигателя. Вместе с тем подавляющее большинство реальных нагрузок, особенно нагрузок горных машин, характеризуется динамическим изменением нагрузки во времени. В этом случае, помимо воспроизведения на стенде статической нагрузки, необходимо также воспроизведение и электромеханической постоянной времени натурной системы двигатель - рабочая машина. Очевидно, что вторым критерием подобия для нагрузочных стендов является

$$\frac{T_{м0}}{T_{м_м}} = idem,$$

где $T_{м0}=(J_д\delta_0+J_{пр})\Delta\omega_н/M_н$ - электромеханическая постоянная времени натурной системы; $T_{м_м}=(J_д\delta_m+J_m)\Delta\omega_н/M_н$ - электромеханическая постоянная времени натурного двигателя на стенде.

Очевидно, что этот критерий подобия сводится к требованию воспроизведения на стенде эквивалентной механической инерции ротора двигателя и рабочей машины

$$\frac{(J_д\delta_0+J_{пр})}{(J_д\delta_м+J_м)} = idem$$

или

$$\Delta_м = \left(\delta_0+\frac{J_{пр}}{J_д}\right) = idem,$$

где δ_0, $\delta_м$ - коэффициенты увеличения момента инерции двигателя соответственно оригинала и модели за счет муфты сцепления и тормозящего шкива или диска; $J_{пр}=J_н/i^2$ - приведенный к валу двигателя момент инерции натурной рабочей машины; $\Delta_м$ - коэффициент увеличения момента инерции испытуемого двигателя на нагрузочном стенде.

При испытаниях на стенде натурных двигателей номинальный момент нагрузочной машины должен быть того же порядка, что и номинальный момент испытуемых двигателей, т.е.

$$M_{нм} \geq M_{но}.$$

В настоящее время нагрузочные стенды в большинстве случаев реализуются на базе нагрузочной машины постоянного тока с независимым стабилизированным возбуждением. Структурная схема управления нагрузочной машиной стенда приведена на рис.I. Энергия торможения нагрузочной машины НМ через тиристорный преобразователь ТП возвращается в сеть. Схема управления строится как квазиинвариантная по скорости вращения испытуемого двигателя. Для этого в схеме НМ-ТП предусмотрен контур положительной связи по частоте вращения двигателя. Выходной величиной в схеме управления является нагрузочный момент $M_{НМ}$ или ток $I_{НМ}$ нагрузочной машины. Для снижения статической и динамической ошибки воспроизведения заданного то-

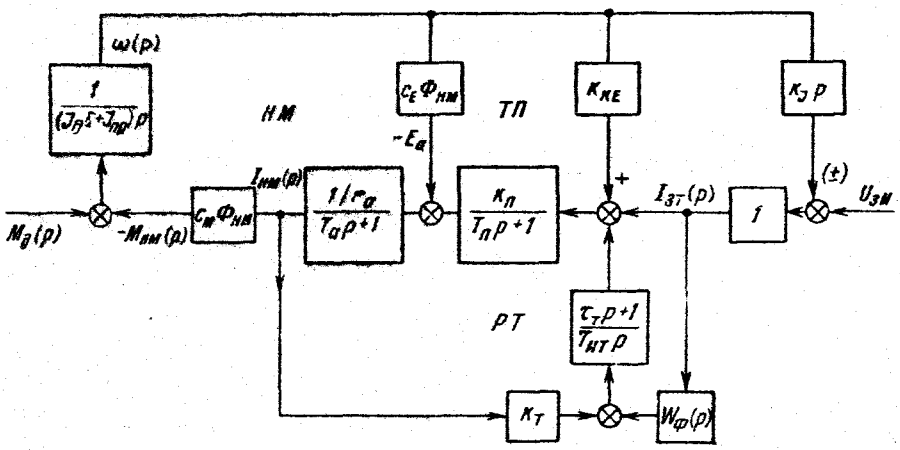


Рис.1. Структурная схема нагрузочного стенда

ка предусмотрен регулятор тока в контуре селективной коррекции с дифференциальной обратной связью. Регулятор тока пропорционально-интегрального типа (ПИ-регулятор), с помощью которого установившаяся ошибка воспроизведения сводится к нулю, снижает динамическое запаздывание процесса до малой постоянной времени $T_Т = 2T_П$.

На рис.2 показано построение, характеризующее работу нагрузочного привода НМ–ТП. Скоростные зависимости обратной э.д.с. двигателя и напряжения ТП настраиваются так, чтобы $E_{НМ0} = U_{ТП0}$ при любой скорости ω испытуемого двигателя. В этом случае ток и момент нагрузочной машины однозначно определяются величиной и характером изменения управляющего сигнала $U_{ЗМ}$. Работа стенда с отдачей через ТП энергии в сеть характеризуется высоким КПД.

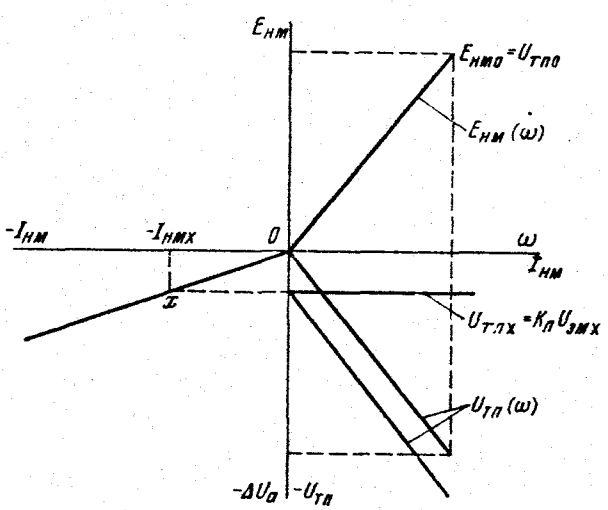


Рис.2. Графическое определение тока нагрузочной машины стенда

Для воспроизведения на нагрузочном стенде механической инерционности натурного привода в схеме управления нагрузочной машины предусмотрена обратная связь по величине ускорения испытуемого двигателя. Поскольку обычно требуется уменьшать эквивалентную инерционность агрегата испытуемый двигатель –

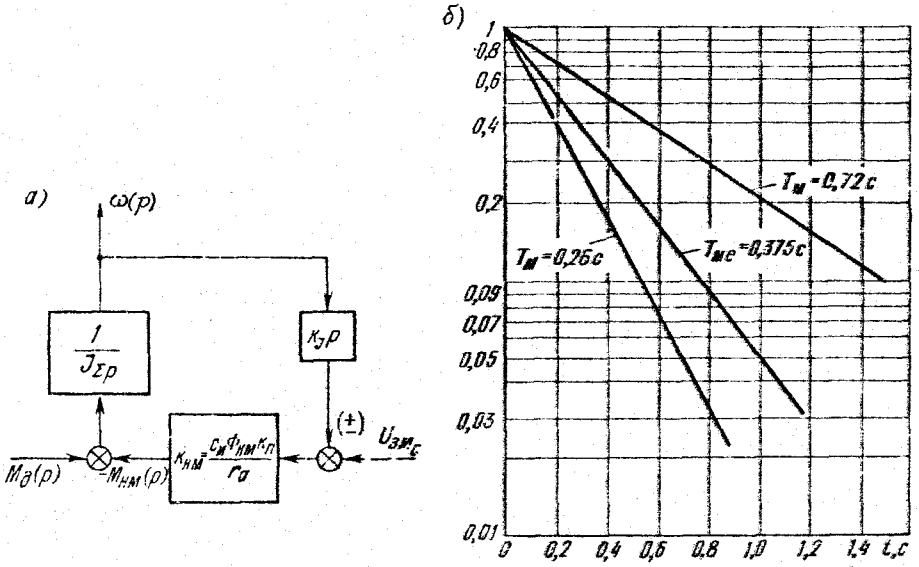


Рис.3. Схема (а) и характеристики (б) моделирования механической инерционности на нагрузочном стенде

нагрузочная машина, эта связь по ускорению вводится на вход как положительная. Согласно схеме (рис.3,а) эквивалентная инерционность нагрузочного агрегата может быть оценена по формуле

$$J_э = \left(J_д \hat{\delta}_м + J_{нм}\right) \mp \frac{c_м \Phi_{пм}}{r_а} k_п k_J .$$

При известных параметрах нагрузочного стенда для воспроизведения требуемого $\Delta_м$ коэффициент обратной связи по ускорению двигателя опре-

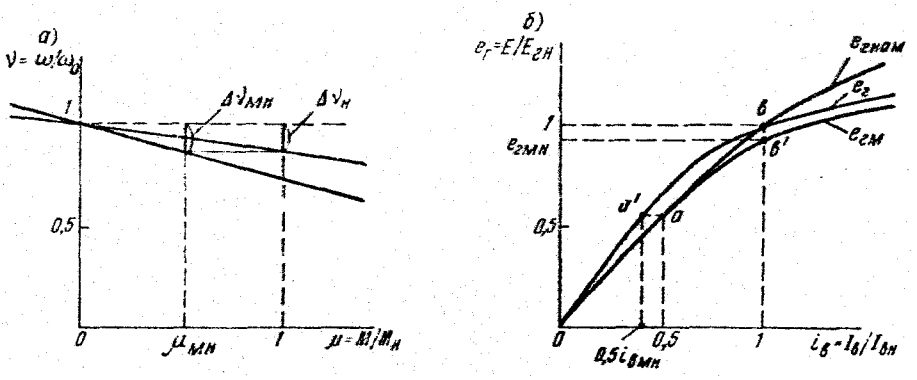


Рис.4. Характеристики натурных и модельных машин постоянного тока для выбора мощности двигателя (а) и генератора (б) модели

деляется по соотношению

$$k_J = \frac{\left[\left(\delta_M + \frac{J_{НМ}}{J_д}\right) - \Delta_M\right]}{\frac{c_M \Phi_{НМ}}{r_a} k_П}.$$

На рис.3,б приведены характеристики остановки двигателя на нагрузочном стенде при изменении k_J. Если принять маховые массы двигателя и нагрузочной машины равными, т.е. $J_д \delta = J_{НМ}$, то посредством положительной связи по ускорению двигателя эквивалентная масса нагрузочной машины может быть уменьшена более чем на 60 %, а при отрицательной связи – увеличена более чем на 80 %.

Для испытаний двигателей горных машин нагрузочные стенды выполняют со специальным задающим программным устройством для воспроизведения нагрузки случайного характера изменения.

Воспроизводящие стенды предназначены для испытаний и исследований натурных систем управления электромеханических систем. Они должны воспроизводить на элементах малой мощности параметры мощных электромеханических систем с теми же величинами входных данных для систем управления. При воспроизведении на модели натурных электромеханических систем необходимо, чтобы относительные механические характеристики натуры и модели, а также основные электромагнитные постоянные времени их были одинаковыми. При воспроизведении на модели мощных приводов постоянного тока по схеме Г-Д с тиристорным возбуждением необходимо воспроизведение жесткости механической характеристики Г-Д и основной электромагнитной постоянной времени цепи возбуждения генератора. Жесткость механической характеристики обратно пропорциональна ее крутизне и определяется наклоном рабочей части механической характеристики двигателя в рассматриваемой системе управления, в частности, в системе Г-Д

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{M_н}{\Delta\omega_н}.$$

Критерий подобия для воспроизведения механических характеристик двигателя в системе Г-Д

$$\frac{\left(\frac{\Delta\omega_н}{\omega_{0н}}\right) \Big/ \left(\frac{M_н}{M_н}\right)}{\Delta\nu_{МН}} = \frac{\Delta\nu_н}{\Delta\nu_{МН}} = idem.$$

Критерий подобия для воспроизведения электромагнитной постоянной времени цепи возбуждения получается в виде

$$\frac{T_{ГВ}}{T_{ГВМ}} = \frac{L_{вГ} / r_{вГМ}}{L_{вГМ} / r_{вГМ}} = idem.$$

При этом характеристики намагничивания генераторов натуры и модели также должны быть идентичны, т.е.

$$\frac{E_Г}{E_{Гm}} = \frac{\frac{\omega_Г}{\omega_{ГН}}\varphi\left(\frac{i_в}{i_{вН}}\right)}{E_{Гm}} = idem.$$

Моделирование механической характеристики двигателя в системе Г-Д при работе системы с постоянным магнитным потоком двигателя сводится к воспроизведению на модели относительного сопротивления цепи якорей системы Г-Д:

$$\Delta\nu_Н = \rho = \frac{(r_{ад} + r_{аГ})}{R_Н},$$

где $R_Н = \frac{E_{ГН}}{I_{дН}}$.

Требуемое относительное сопротивление цепи якорей системы Г-Д воспроизводится на модели путем недоиспользования габаритной мощности машин модели. На рис.4,а показано определение степени недоиспользования машин модели Г-Д для получения требуемой крутизны механических характеристик. Эта степень недоиспользования габаритной мощности машин модели определяется выбранной мощностью машин модели. Выбор можно осуществлять последовательно: вначале выбирается модельный электродвигатель, а затем генератор. Для выбора мощности модельного двигателя используют характеристики ρ_a, $P_{мех}$ и T_M серии машин, из которой предполагается выбор модельного двигателя (рис.5).

Габаритная мощность двигателя модели берется по точке перегиба A кривой изменения относительного сопротивления якоря. Как видно, для данной габаритной мощности двигатели имеют минимальные относительные потери холостого хода и среднее значение электромеханической постоянной времени. Для моделирования двигателей постоянного тока габаритная мощность двигателя модели составляет 10 кВт. При воспроизведении относительного сопротивления цепи якорей системы Г-Д обычно не идут на снижение габаритной мощности двигателя модели более чем в два раза, чтобы не слишком увеличивать потери холостого хода двигателя. Возможную неточность моделирования относительного сопротивления якоря двигателя компенсируют далее большим недоиспользованием габарита генератора.

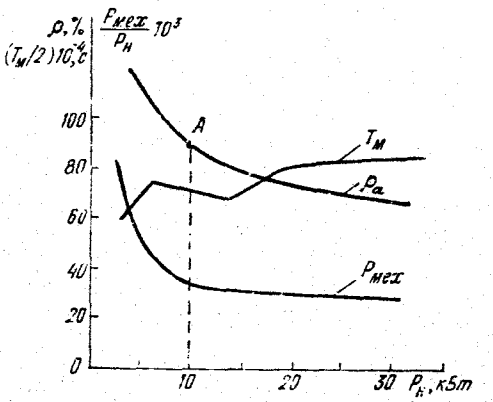


Рис.5. Характеристики серии двигателей постоянного тока

Таким образом, выбор генератора модели выполняется по двум условиям - условию воспроизведения натурной характеристики намагничива-

ния и моделирование относительного сопротивления цепи якорей системы Г-Д. Характеристика намагничивания в модельном генераторе воспроизводится по рабочему участку характеристики намагничивания натурного генератора путем выбора уровня номинальных э.д.с. и тока возбуждения (см. рис.4, б). Характеристики холостого хода натурного и модельного генераторов строятся в относительных величинах $e_Г = f(i_в)$ и $e_{ГМ} = f(i_{вМ})$ на общем графике. Для определения номинального тока возбудителя модельного генератора совмещают в средней части характеристики холостого хода - точки a и a'. При этом устанавливается значение тока возбуждения модельного генератора $i_{вМН}$. Далее перестраивают характеристику холостого хода модельного генератора для нового значения номинального тока возбуждения $i_{вМН}$ и определяют номинальную э.д.с. генератора модели - точка b'. Исходная габаритная мощность генератора модели уменьшается:

$$P'_{ГМ} = P_{ГМН}\left(\frac{E_{ГМ}}{E_{ГН}}\right).$$

Габаритная мощность генератора модели определяется по условию воспроизведения требуемого относительного сопротивления натурной системы Г-Д по соотношению

$$r_{ГМ} = \rho_{ГД} R_Н - r_{ДМ}.$$

Обычно мощность генератора модели не превышает удвоенного значения габаритной мощности двигателя модели. Возбудительная цепь натурного гене-

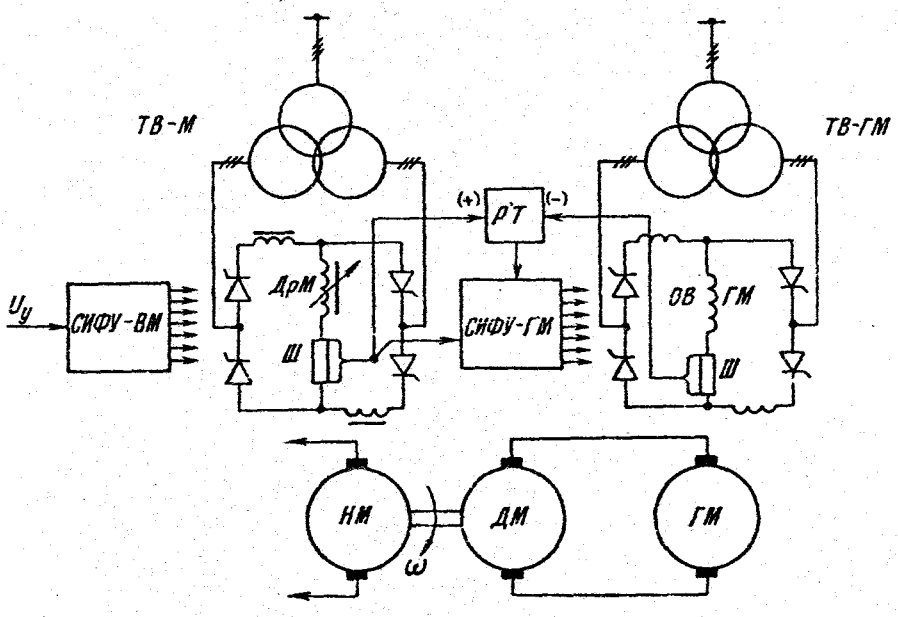


Рис.6. Принципиальная схема воспроизводящего стенда для моделирования привода постоянного тока по схеме ТВ-Г-Д

ратора с тиристорным возбудителем моделируется по схеме моделирования процессов изменения тока возбуждения генератора (рис.6). Для этого модель дополняется вторым тиристорным возбудителем.

Тиристорный возбудитель модели ТВ-М с натурными входными параметрами работает на регулируемый дроссель и активное сопротивление с той же постоянной времени, что и постоянная времени цепи возбуждения генератора:

$$T_{вт} = \frac{L_{дрМ}}{r_{дрМ}} = T_{вГ}.$$

Ток модельного возбудителя ТВ-М усиливается далее тиристорным возбудителем генератора модели ТВ-ГМ с контуром селективной связи по току возбуждения и ПИ-токовым регулятором (корректором) РТ. В результате ток возбуждения генератора модели изменяется практически без дополнительных искажений, также как ток нагрузки модельного возбудителя ТВ-М.

В таком виде на воспроизводящем стенде воспроизводятся статические и динамические параметры мощных электромеханических систем с двигателем постоянного тока и проводятся разносторонние исследования натурных систем управления.

При исследовании натурных систем управления и регулирования электроприводами с асинхронными двигателями переменного тока моделирование на воспроизводящих стендах при использовании стандартных двигателей может быть выполнено раздельно для квазиустановившихся режимов работы на рабочем участке характеристики и переходных процессов при работе на пусковой части характеристики двигателя.

Для первого типа исследований асинхронный двигатель модели выбирается по условию воспроизведения номинального скольжения натурного двигателя

$$\frac{s_{НМ}}{s_{Н}} = \frac{\Delta\nu_{НМ}}{\Delta\nu_{Н}} = idem.$$

Моделирование номинального скольжения асинхронного двигателя, также как моделирование относительного номинального падения скорости двигателей постоянного тока, осуществляется путем недоиспользования габаритной мощности двигателя модели (рис.7, а). Здесь также номинальная мощность двигателя модели выбирается из условия снижения его мощности в модели не более чем в два раза, т.е. мощность асинхронного двигателя модели

$$\frac{P_{дНМ}}{P_{дН}} \leq 2.$$

Моделирование пусковой части характеристики асинхронного двигателя выполняется по условию воспроизведения кратности пускового и критического моментов двигателя оригинала:

$$\lambda = \frac{M_{к}}{M_{Н}} = idem;$$

$$K_{П} = \frac{M_{П}}{M_{Н}} = idem.$$

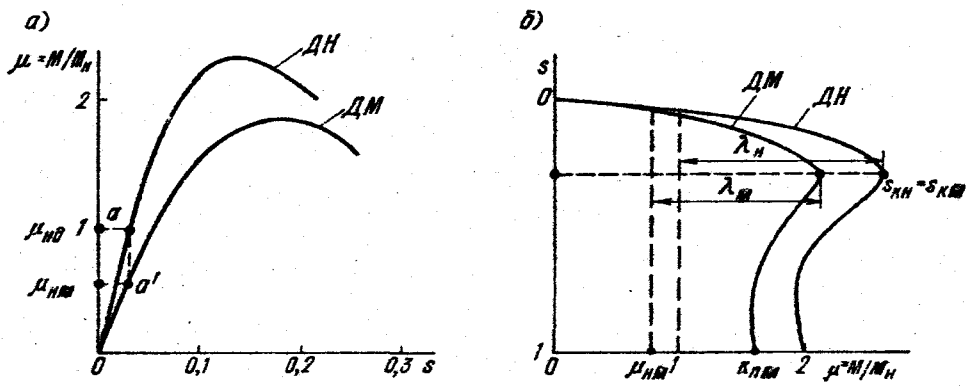


Рис.7. Характеристики натурного и модельного асинхронных двигателей для воспроизведения рабочей части (а) и пусковой части (б) характеристики двигателя

Для выполнения этого условия подобия двигатель модели выбирается такого типа, чтобы он имел λ такое же, как и натурный двигатель (рис.7, б). Реализация второго критерия подобия осуществляется уменьшением номинального значения момента, но не больше, чем в два раза. Тиристорный преобразователь или регулирующее устройство в воспроизводящих стендах переменного тока выбирается того же типа и схемы, что и в натурной системе. Мощность преобразователя в модельном приводе выбирается из условия идентичности поправочного коэффициента в уравнении механической характеристики асинхронного двигателя от влияния активного сопротивления цепи статора двигателя

$$\varepsilon = \frac{r_{1\Sigma}}{\sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_k^2}} = idem.$$

Если это условие трудно проверить, то по габаритной мощности двигателя модели мощность преобразователя берут в том же отношении, что и в натурном приводе, т.е.

$$\frac{P_{\text{ТП}}}{P_{\text{дН}}} = \frac{P_{\text{ТПМ}}}{P_{\text{дНМ}}} = idem.$$

Если параметры и характеристики натурной электромеханической системы линейны и нет сложных внутренних связей, то воспроизводящие стенды для исследования натурных систем управления выполняют комбинированного типа, заменяя силовую часть и двигатель натурной системы их аналоговой моделью[x]. Например, при моделировании линейной электромеханической системы по схеме Г-Д с тиристорным возбуждением в воспроизводящей модели применяют мо-

[x] В.В.Рудаков. Промышленная кибернетика электрифицированных горных машин и комплексов. Л., изд.ЛГИ, 1978.

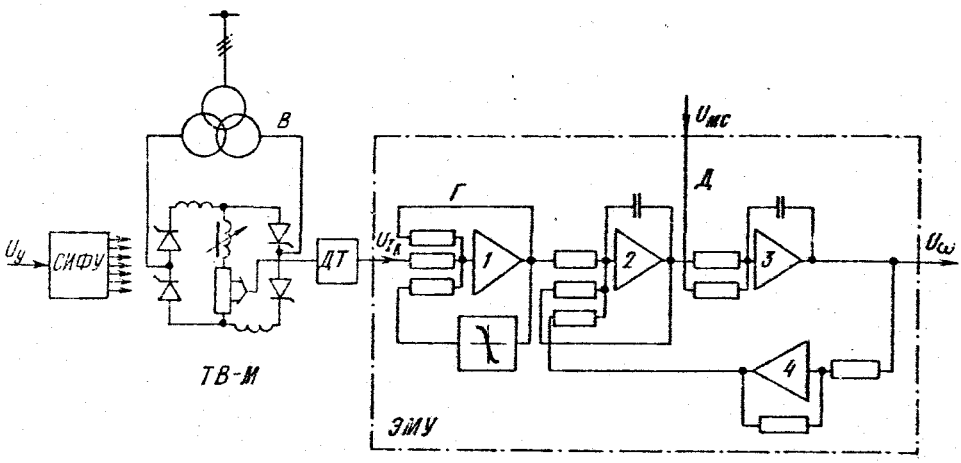


Рис.8. Принципиальная схема комбинированного воспроизводящего стенда для моделирования приводов по схеме ТВ-Г-Д

дель только тиристорного возбудителя, а генератор и двигатель воспроизводят на электронной моделирующей установке. На рис.8 приведена принципиальная схема такой воспроизводящей модели, в которой тиристорный возбудитель модели ТВ-М сопряжен через датчик ДТ с аналоговой моделью системы Г-Д в виде электронной моделирующей установки ЭМУ. Для подключения натурной системы управления к комбинированной воспроизводящей модели требуются дополнительные блоки датчиков обратных связей по текущим координатам, полученным на ЭМУ. Коэффициенты схемы набора ЭМУ определяются уровнем сигналов и передающими коэффициентами звеньев натурной системы.

Перспективы дальнейшего развития электромеханических испытательных стендов. Нагрузочные стенды пока наиболее рационально выполнять с двигателями постоянного тока с тиристорным питанием. Схемы управления ими будут базироваться на аналоговых или цифровых программирующих устройствах. Существенное развитие для них должны получить специальные средства индикации трудноизмеримых параметров электродвигателей, к которым относятся электромагнитные, электромеханические величины и портреты распределения перегревов в обмотках и магнитопроводе машины. Особое значение в связи с повышением использования габаритов машин имеют устройства контроля эффективности охлаждения электрических машин. Наконец, важное значение приобретают методы оценки энергетических показателей электродвигателей, особенно в условиях нестационарной нагрузки и колебаний питающего напряжения.

Воспроизводящие стенды приобретают все большее значение в связи с повышением единичной мощности установок, исследование и отладка систем управления и контроля для которых имеют особо важное значение. Развитие работ по воспроизводящим стендам, по-видимому, пойдет по двум направлениям.

I. Создание электромеханических аналогов небольшой мощности для исследований и отработки внутренней геометрии, обмоточных данных и теплоот-

вода создаваемых мощных электродвигателей и других электромеханических устройств. Здесь потребуется разработка и создание электромеханических аналогов крупных машин, а также разработка специальных средств и методов оценки оптимальности тех или иных электромагнитных соотношений, закладываемых в создаваемые серии или отдельные электродвигатели. Для этого класса воспроизводящих стендов наиболее вероятно сочетание электромеханической модели со специализированной вычислительной машиной.

2. Создание воспроизводящих стендов для исследования электромеханических систем с полупроводниковыми силовыми управляющими устройствами или электромеханическими управляющими и регулирующими устройствами с механической связью с главным приводом. Эти воспроизводящие системы будут развиваться пока на базе электронных моделирующих установок с аналоговым (структурным) набором исследуемой электромеханической, тепломеханической или гидромеханической системы и воспроизводящим модельным электроприводом, сообщающим необходимую механическую мощность устройствам управления и регулирования. Для этого класса стендов потребуется разработка различного рода унифицированных сопрягающих и выявительных устройств. Особое значение здесь также приобретает разработка машинных методов контроля и оптимальности функционирования натурных систем управления мощных механических систем в критических режимах эксплуатации. Методы должны получить свою конкретную реализацию на воспроизводящих стендах этого типа в виде специализированных вычислительных машин для оценки текущего функционирования систем управления электромеханических систем.