

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ КОНДЕНСАТОРАМИ И САМОВОЗБУЖДЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В РУДНИЧНЫХ СЕТЯХ

А. В. Рысьев, О. В. Иванов, Б. И. Комаров, В. Г. Бауман

Вопросы автоматического регулирования напряжения в местных электрических сетях являются важной частью общей проблемы комплексной механизации и автоматизации производственных процессов в горной промышленности. Стабильный уровень напряжения необходим для устойчивой работы автоматических устройств, более полного использования естественных механических свойств электроприводов, уменьшения потерь электрической энергии в местных распределительных сетях.

Колебание уровня напряжения в местных электрических сетях может быть обусловлено двумя принципиально различными причинами: 1) общим изменением режима работы питающей системы (сменными, суточными и сезонными изменениями нагрузки в питающей системе); 2) изменением режима работы приемников в рассматриваемой местной распределительной сети (пуск двигателей, колебание нагрузки и т. п.).

Для первой группы изменений уровня напряжения, обусловленных внешними факторами, характерны сравнительно небольшая глубина и значительная длительность отклонений (часы, реже минуты). Для второй группы изменений, вызванных внутренними факторами, характерны значительная глубина и кратковременность отклонений (обычно секунды и реже доли секунд).

В качестве примера изменений уровня напряжения второй группы на рис. 1 представлены графики $U=f(t)$, записанные самопишущими вольтметрами в различных точках сети участка сланцевой шахты. Кратковременные и глубокие изменения уровня напряжения предъявляют высокие требования к скорости действия регуляторов напряжения в местной распределительной сети.

Среди работ, посвященных вопросам регулирования напряжения в распределительных сетях горнодобывающих предприятий, первое место занимают те, в которых рассматривается регулирование напряжения с помощью регулируемых трансформаторов и дросселей насыщения [3, 4].

Однако, как показали предварительные исследования авторов, возможные трансформаторно-дроссельные схемы регуляторов напряжения имеют большую инерционность и искажают выходное напряжение*.

* См. «Авторегулирование уровней напряжения в подземных сетях на участке шахты». Рукопись. Фонды ЛГИ, 1958.

Применение последовательных конденсаторов в местных сетях горных предприятий недостаточно полно освещено в технической литературе [2—5], хотя с точки зрения быстроты действия наиболее приемлемым средством регулирования напряжения в местных сетях являются последовательные конденсаторы, представляющие собой практически безынерционный регулятор напряжения.

Настоящая статья посвящена краткому обзору результатов исследования схем с последовательными конденсаторами. Исследования проводились сотрудниками кафедр общей электротехники и горной электротехники в лаборатории автоматики и телемеханики в горном деле Ленинградского горного института*.

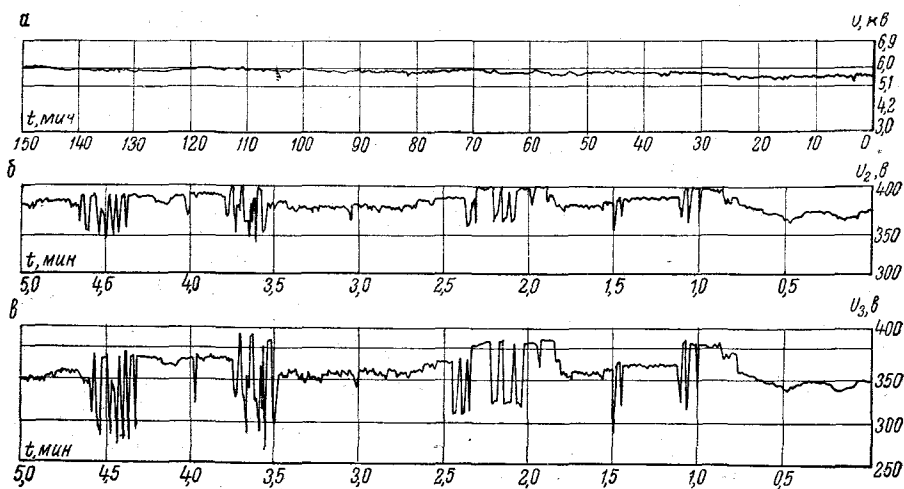


Рис. 1. Диаграмма напряжения для различных точек распределительной сети участка 1 шахты № 6:

а — на зажимах обмотки высокого напряжения трансформатора; б — на зажимах обмотки низкого напряжения трансформатора; в — на распределительном пункте

При изучении способа регулирования напряжения последовательными конденсаторами возникла необходимость рассмотреть отдельно установившиеся режимы без учета и с учетом переходных процессов в цепях с трансформаторами и вращающимися машинами**.

Для шахтных линий, в которых предусматривается регулирование напряжения, характерно следующее.

1. Малая собственная индуктивность кабельных линий низкого напряжения, что вызывает необходимость компенсации части индуктивности приемника.

2. Резко переменная нагрузка линий, создаваемая отдельными сравнительно мощными двигателями.

3. Коэффициент мощности потребителя, определяемый отдельным двигателем, колеблется от значений, соответствующих холостому ходу двигателя, до номинальных.

Применение последовательных конденсаторов позволит компенсировать полностью или частично потери напряжения в линиях. Обозначая отношение напряжения на зажимах приемников в компенсированной

* В экспериментальной части работы принимали участие студенты электромеханического факультета В. Беран, Э. Г. Гребень, Л. П. Каплун, Ю. Г. Моряков.

** Подробнее см. «Авторегулирование уровней напряжения в распределительных сетях горнодобывающих предприятий». Рукопись. Фонды ЛГИ, 1959.

линии U_n к напряжению в начале линии U_1 через τ , получим условие полной или частичной компенсации

$$z_n = \sqrt{R_n^2 + X_n^2} = \tau \sqrt{(R_n + R_l)^2 + (X_n + X_l - X_c)^2} = \tau z_0, \quad (1)$$

где R_n , X_n , z_n — активное, реактивное и полное сопротивление приемника;

R_l , X_l — активное и реактивное сопротивление линии;

X_c — емкостное сопротивление конденсаторов;

τ — заданная степень компенсации потери напряжения;

z_0 — модуль сопротивления линии и приемника.

В процессе анализа формулы (1) получено выражение для определения необходимой емкости конденсаторов

$$X_{c1,2} = (X_n + X_l) \pm \sqrt{\frac{1}{\tau^2} z_n^2 - (R_l + R_n)^2} = (X_n + X_l) \pm \sqrt{-D}, \quad (2)$$

где D — подкоренное выражение с обратным знаком.

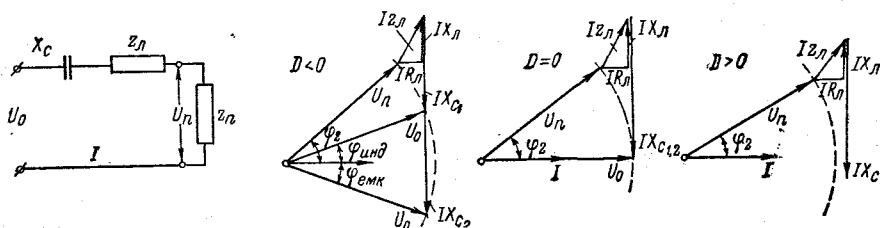


Рис. 2. Эквивалентная схема и векторные диаграммы компенсированной линии при включении конденсаторов со стороны низкого напряжения

Из уравнения (2) следует, что возможность получения заданной степени компенсации не зависит от индуктивного сопротивления линии и определяется неравенством

$$z_n \geq (R_n + R_l) \tau \quad (3)$$

или

$$\cos \varphi_n \leq \frac{1}{\left(1 + \frac{R_l}{R_n}\right) \tau}, \quad (4)$$

где $\cos \varphi_n$ — коэффициент мощности приемника.

На рис. 2 приведены эквивалентная схема и векторные диаграммы режимов работы при $\tau=1$ для случаев $D<0$; $D=0$; $D>0$. Как видно из рисунка, при $D<0$ возможны два режима — индуктивный и емкостный. Для благоприятного протекания переходных процессов необходимо работать в индуктивном режиме.

При включении последовательных конденсаторов со стороны высокого напряжения трансформатора расчетная формула для определения емкостного сопротивления имеет вид

$$X_{c1,2} = (X_k + X_l' + X_n') \pm \sqrt{\frac{1}{\tau^2} z_n'^2 - (R_l' + R_n' + R_k)^2}, \quad (5)$$

где X_k , R_k — сопротивления короткого замыкания трансформатора;

X_l' , X_n' , z_n' , R_l' , R_n' — величины сопротивлений, приведенные к первичному напряжению.

Поскольку величины X_n и R_n являются функциями нагрузки (режима) и при вычислении X_c по формулам (2) и (5) может быть достигнута заданная степень компенсации τ только при определенном режиме, то была проведена теоретическая и опытная проверка внешней характеристики компенсированной линии

$$\tau := f\left(\frac{I}{I_n}\right),$$

где I и I_n — фактический и номинальный ток линии.

Построение теоретических внешних характеристик в относительных единицах производилось по круговой диаграмме для Г-образной схемы

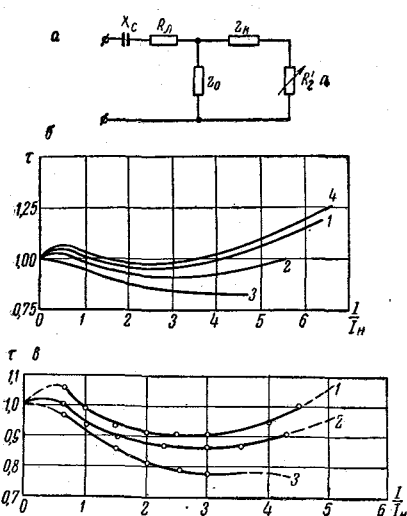


Рис. 3. Эквивалентная схема и внешние характеристики компенсированной линии, работающей на асинхронный двигатель:

а — схема замещения асинхронного двигателя и компенсированной линии; Z_0 , Z_k — сопротивления намагничивающего контура и короткого замыкания асинхронного двигателя; R'_n — нагрузочное сопротивление; б — теоретические характеристики в случае компенсации: 1 — по номинальному режиму; 2 — по пуску; 3 — при отсутствии компенсации; 4 — по опрокидыванию; в — опытные характеристики в случае компенсации: 1 — по пуску и $\tau=1$; 2 — по пуску и $\tau=0,9$; 3 — при отсутствии компенсации

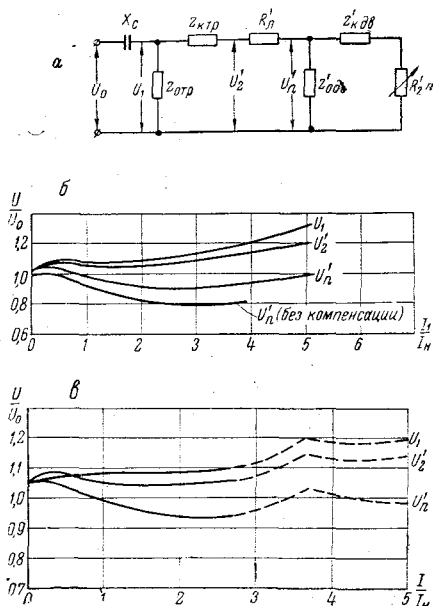


Рис. 4. Эквивалентная схема и внешние характеристики компенсированной линии, работающей на асинхронный двигатель при включении конденсаторов со стороны высокого напряжения:

а — схема замещения компенсированной линии, трансформатора и асинхронного двигателя (штрихами отмечены параметры схемы замещения, приведенные к первичной обмотке трансформатора); б — теоретические характеристики; в — опытные характеристики

замещения асинхронного двигателя (рис. 3). Опытная проверка проводилась на статической схеме замещения, так как возникновение параметрического резонанса на вращающейся машине не позволяло снять характеристики при заданных τ .

Анализ внешних характеристик (опытных и расчетных) свидетельствует о следующем: а) наиболее благоприятную форму внешняя характеристика имеет при полной компенсации по пуску ($\tau=1$) и индуктивном режиме; б) для получения $\tau=1$ при всех нагрузках необходимо автоматическое изменение X_c по определенному закону.

Аналогично были проверены внешние характеристики для случая включения конденсаторов со стороны высокого напряжения (рис. 4) *.

* Опытные характеристики сняты на вращающейся машине, излом их вызван самовозбуждением двигателя.

Полученные результаты позволяют сделать выводы, аналогичные ранее полученным для случая включения конденсаторов со стороны низкого напряжения.

Для установления закона изменения емкостного сопротивления в зависимости от режима работы на эквивалентной статической схеме замещения (рис. 3) были сняты при постоянном τ характеристики (рис. 5)

$$\frac{X_c}{X_{сн}} = f\left(\frac{I}{I_n}\right),$$

где $X_{сн}$ — емкостное сопротивление, выбранное для компенсации по пуску при $\tau = 1$.

Установление закона изменения компенсирующей емкости в функции нагрузки позволяет искать пути автоматизации изменения емкости (разрыв характеристик, как видно из формул (2), (5), соответствует случаю $D > 0$).

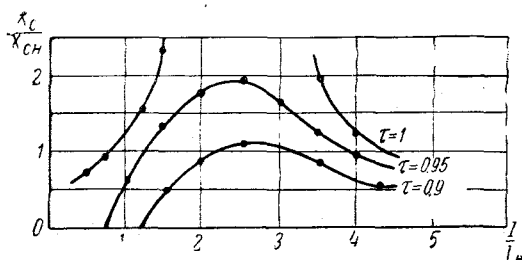


Рис. 5. Графики $\frac{X_c}{X_{сн}} = f\left(\frac{I}{I_n}\right)$ при постоянном τ

Более сложными и труднее поддающимися расчету режимами по сравнению с нормальными установившимися являются различные ненормальные режимы, которые могут возникать в линиях или сетях с последовательно включенными конденсаторами. К таким сопутствующим включению конденсаторов режимам или явлениям относятся: 1) автопараметрическое возбуждение трансформаторов (феррорезонанс), возникающее при подключении их на холостом ходу или при малой нагрузке; 2) параметрическое возбуждение асинхронных двигателей (самовозбуждение), чаще всего имеющее место при пуске.

Автопараметрическое возбуждение трансформаторов (феррорезонанс), возникающее при подключении их на холостом ходу или при малой нагрузке; 2) параметрическое возбуждение асинхронных двигателей (самовозбуждение), чаще всего имеющее место при пуске.

Автопараметрическое возбуждение трансформаторов на низких частотах (феррорезонанс на субгармониках) вызывает колебания напряжения, которые при подключении нагрузки гасятся и поэтому не являются опасными. Возбуждение же на частотах сети (феррорезонанс на основной частоте) связано с возникновением перенапряжений и больших токов, поэтому является опасным. Возникновение и гашение автопараметрического резонанса показано на рис. 6, а, б. Автопараметрическое возбуждение трансформаторов сравнительно легко устраняется при шунтировании емкости активным сопротивлением.

Асинхронные двигатели при самовозбуждении работают одновременно как двигатели на частоте сети и как генераторы с более низкой частотой, не зависящей от частоты сети и связанной только с параметрами колебательной системы. Самовозбуждение может возникать при работе двигателя с нормальной скоростью, но наиболее вероятно его появление при запуске. При определенных условиях самовозбуждение связано с застреванием двигателя на низких скоростях, появлением субгармоник в токах и напряжениях, с биениями момента и скорости.

Если двигатели являются доминирующей нагрузкой для трансформатора, то их самовозбуждение может вызвать автопараметрическое возбуждение трансформатора, в результате чего устойчивость системы ухудшается. Включение параллельно или последовательно емкости активного сопротивления при определенных условиях предотвращает появление

ние самовозбуждения двигателей. Возникновение и развитие самовозбуждения асинхронных двигателей показано на осциллограммах рис. 6, в, г, д, е, ж. Как показывают опыты, наиболее трудноустраняемым из

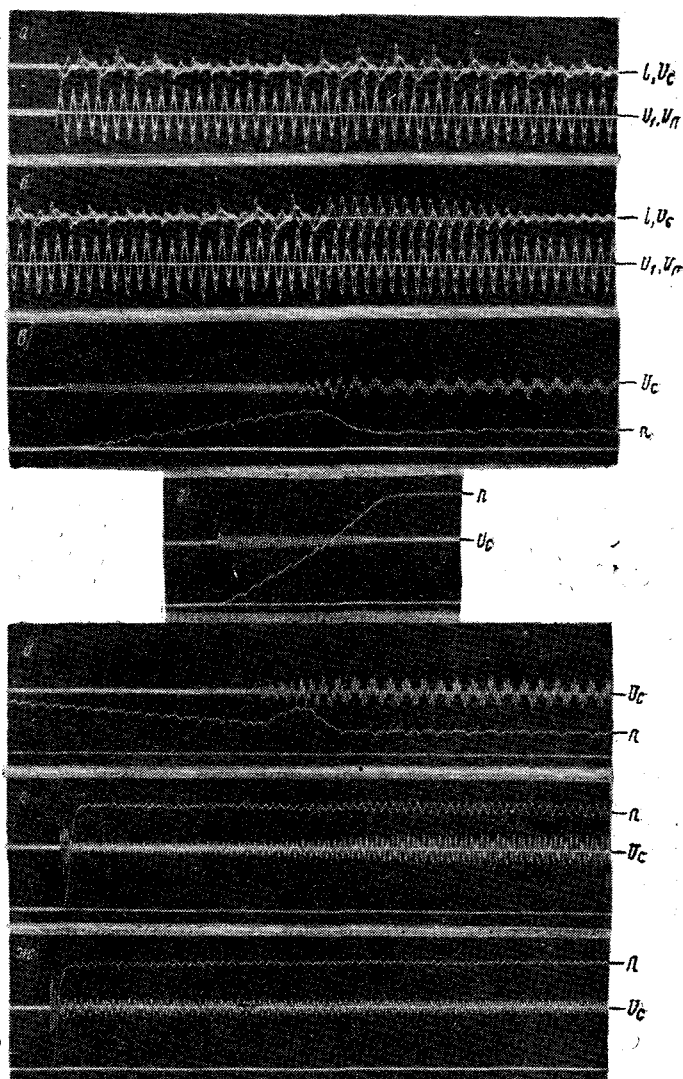


Рис. 6. Осциллограммы переходных процессов:
 а — автопараметрическое возбуждение трансформатора на субгармонике $\frac{1}{3}$; б — гашение автопараметрического возбуждения трансформатора при включении двигателя; в — параметрическое возбуждение двигателя при пониженном напряжении; г — прохождение двигателя через зону возбуждения при более высоком напряжении; д — возбуждение при повторном пуске неостановленного двигателя; е — возбуждение двигателя при номинальном напряжении; ж — затухание возбуждения двигателя при повышенном напряжении

рассмотренных явлений является самовозбуждение асинхронных двигателей.

Исследование самовозбуждения в данном случае затруднено множеством факторов, влияющих на процесс самовозбуждения.

В настоящее время используются следующие методы исследования самовозбуждения:

- 1) методы, основанные на анализе характеристического определителя систем дифференциальных уравнений;
- 2) аналитические и графические методы исследования схемы замещения асинхронной машины для свободных токов.

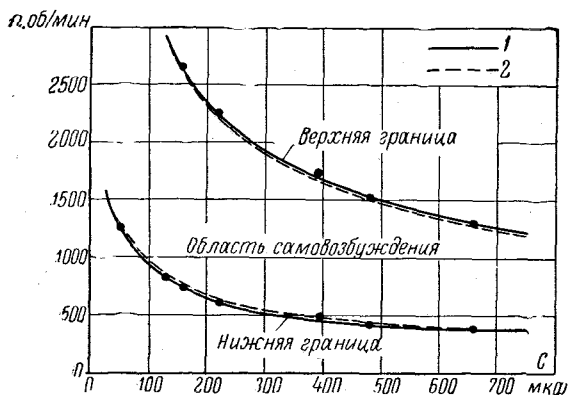


Рис. 7. Скоростные границы области самовозбуждения асинхронной машины АОЛ-31-4:
1 — опытные; 2 — расчетные

самовозбуждение асинхронных машин в генераторном и двигательном режимах. Сопоставление полученных и расчетных скоростных (рис. 7) границ показало достаточно точное их совпадение.

При снятии характеристики $R=f(X_c)$ или области самовозбуждения при постоянной скорости определялась величина сопротивления, включенного в цепь статора, при котором самовозбуждение на данной скорости вращения ротора прекращалось. Опытные характеристики для двигателя АОЛ-31-4 приведены на рис. 8. Там же даны расчетные характеристики, построенные по круговой диаграмме схемы замещения асинхронной машины для свободных токов. Сопоставление опытных и расчетных характеристик свидетельствует о подобии областей самовозбуждения и значительной разнице величин сопротивлений.

Эта разница вызвана тем, что расчетный метод не учитывает потерь в стали и насыщения магнитной цепи.

Условия возбуждения асинхронного двигателя принципиально отличны от условий возбуждения автономного генератора.

Двигательному режиму присущи следующие особенности развития возбуждения.

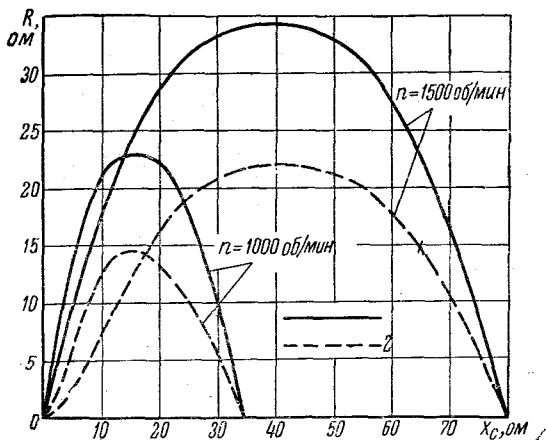


Рис. 8. Области самовозбуждения асинхронной машины АОЛ-31-4 при постоянной скорости вращения:
1 — расчетные; 2 — опытные

1. Параметры машины зависят не только от напряжений и токов свободного процесса, но и от величины напряжений и токов вынужденного процесса, имеющих частоту источника питания.

2. Скорость вращения ротора машины в вынужденном режиме зависит от конструкции машины, частоты и напряжения источника и величины момента сопротивлений.

3. В процессе разгона при прохождении резонансной области возможно возбуждение двигателя при скоростях меньше скорости нормальной работы. Вероятность застревания двигателя в зоне возбуждения определяется временем прохождения этой зоны, которое зависит от величины момента статических и динамических сопротивлений, напряжения источника и параметров схемы.

4. Устойчивая работа возбужденного двигателя возможна лишь на нижней скоростной границе зоны возбуждения [6].

Целью экспериментального исследования возбуждения асинхронных двигателей являлась оценка степени влияния отдельных из перечисленных факторов, и в первую очередь величины приложенного напряжения на процесс параметрического возбуждения двигателя.

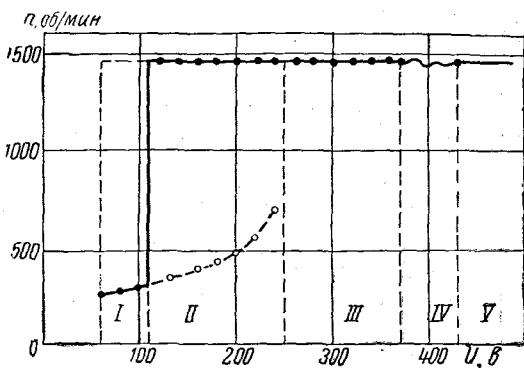


Рис. 9. График $n = f(U_1)$ двигателя АОЛ-31-4 при $X_c = 7,3$ ом, $R_d = 1$ ом

В настоящее время выполнена часть намеченной программы: оценка влияния величины приложенного напряжения на процесс возбуждения двигателя.

Опыты проводились на двух двигателях АОЛ-31-4 и А-41-6 при различных величинах емкостного сопротивления. Развитие возбуждения двигателя при различных напряжениях иллюстрируется осциллограммами (см. рис. 6).

График $n = f(U_1)$, показывающий результаты одного из опытов, вертикальными пунктирными линиями разделен на пять областей, характерных различными формами развития возбуждения (рис. 9). В области I двигатель при пуске после полной остановки не достигает нормальной скорости, застревая на пониженной соответствующей нижней скоростной границе зоны возбуждения (см. рис. 6, в). В области II двигатель при пуске после полной остановки проходит через зону возбуждения и разгоняется до нормальной скорости (см. рис. 6, г). Однако в этой области при включении двигателя с вращающимся ротором или плавном повышении напряжения, подводимого к возбужденному двигателю, удается получить устойчивую работу двигателя на пониженной скорости, соответствующей нижней границе зоны возбуждения (см. рис. 6, д). В области III возбуждения двигателя не наблюдается. В области IV двигатель возбуждается как при пусках, так и при плавном повышении напряжения, подводимого к нормально работающему (в области III) двигателю. Скорость вращения ротора в этой области незначительно отличается от нормальной. Возбуждение сопровождается устойчивыми колебаниями скорости и момента (см. рис. 6, е). В области V самовозбуждение двигателя быстро гаснет (см. рис. 6, ж), а при больших напряжениях вообще не наблюдается. При вращающемся двигателе

и повышении входного напряжения в области V наблюдается резонанс напряжений.

При увеличении емкостного сопротивления последовательных конденсаторов характер графиков $n=f(U_1)$ меняется: сначала исчезает область III, а затем область II. Различный характер развития возбуждения в областях I и II объясняется различным временем разгона двигателя (в области II свободные колебания не успевают развиваться настолько, чтобы создать достаточный тормозной момент). Наличие областей III, IV и V объясняется нелинейностью параметров двигателя. В областях III и V решающее влияние на самовозбуждение оказывает уменьшение индуктивности холостого хода двигателя при насыщении железа. В обла-

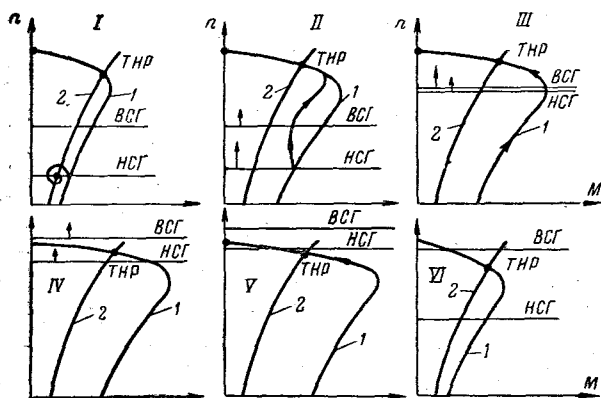


Рис. 10. Пусковые диаграммы асинхронного двигателя:

1 — кривая вращающего момента; 2 — кривая момента сопротивления; ТНР — точка нормальной работы; НСГ — нижняя скоростная граница зоны самовозбуждения; ВСГ — верхняя скоростная граница зоны самовозбуждения

холостого хода при насыщении железа меняется более интенсивно, чем индуктивность рассеяния. Индуктивность рассеяния начинает интенсивно уменьшаться лишь при сильном насыщении железа. В области IV уменьшение индуктивности рассеяния приводит к тому, что точка нормальной работы двигателя (см. рис. 10, ТНР) попадает в зону возбуждения IV. Очевидно, при этом двигатель будет возбуждаться до тех пор, пока при повышении напряжения нижняя скоростная граница НСГ зоны возбуждения не поднимется выше точки нормальной работы V. При больших значениях емкостного сопротивления верхняя скоростная граница ВСГ зоны самовозбуждения даже при нормальном насыщении расположена выше точки нормальной работы VI, чем и объясняется наличие всего двух областей с различными формами возбуждения при больших значениях емкостного сопротивления. Сильное насыщение железа при сравнительно низких напряжениях объясняется наличием при возбуждении низкочастотной составляющей тока. Это объяснение различных форм возбуждения для наглядности несколько упрощено (при насыщении железа изменяются и глубина модуляции индуктивности и активное сопротивление машины).

Выводы

1. Последовательные конденсаторы при правильном выборе режима и степени компенсации могут существенно улучшить внешние характеристики рудничных распределительных сетей.

2. Наиболее опасным и трудноустраняемым сопутствующим явлением в компенсированных рудничных сетях следует считать самовозбуждение асинхронных двигателей.

3. Нелинейность параметров машины, время разгона двигателя и конструктивные особенности машины значительно влияют на развитие возбуждения и должны учитываться при выборе степени компенсации и средств гашения возбуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко М. П. и Пиостровский Л. М. Электрические машины. Ч. II, ГЭИ, 1958.
 2. Материалы НТС по определению нагрузок и регулированию напряжения пром-предприятий. ГЭИ, 1957, вып. 2.
 3. Электрооборудование подземных выработок угольных шахт. Углетехиздат, 1955.
 4. Сб. «Горная электротехника». Углетехиздат, 1958.
 5. Бауман В. Г., Иванов О. В., Комаров Б. И. К вопросу продольной емкостной компенсации потерь напряжения в сетях на участке шахты. Научные доклады высшей школы. «Горное дело», 1958, № 4.
 6. Wagner C. F. Amer. Inst. Electr. Eng., 1941, v. 60.
-