*Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LIII, вып. 1, 1966 г.*

УДК 621.3.013.62

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В РУДНИЧНЫХ СЕТЯХ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ КОНДЕНСАТОРАМИ

*В. Г. Бауман, О. В. Иванов, В. М. Квятковский, Б. И. Комаров*

Потери напряжения, обусловленные большой протяженностью рудничных распределительных сетей, препятствуют нормальной работе электроприводов горных машин и механизмов. Одним из эффективных средств компенсации потерь напряжения, а следовательно и средством обеспечения нормальной работы электродвигателей в таких сетях, является продольная емкостная компенсация [Бауман, Иванов, Комаров, 1962]. Применение ее, однако, осложняется самовозбуждением асинхронных двигателей. Влияние самовозбуждения может оказаться столь значительным, что нормальная работа электродвигателей, несмотря на компенсацию потерь напряжения, окажется невозможной.

Для выявления условий, при которых обеспечивается нормальная работа электродвигателей в сетях с установками продольной компенсации, авторами исследованы механические свойства и особенности самовозбуждения асинхронных двигателей при различных величинах емкости, активных сопротивлений, напряжения сети и маховых моментах вращающихся частей. Механические характеристики $n = f(M)$ при различных параметрах системы и напряжения сети $u$ снимались методом непосредственной нагрузки асинхронного двигателя АОЛ-31-4.

Величина емкости по условиям наиболее благоприятной степени компенсации потерь напряжения при экспериментальном исследовании принималась такой, чтобы емкостное сопротивление $X_c$ было меньше индуктивного сопротивления короткого замыкания $X_к$ асинхронной машины. При этом нижняя и верхняя критические скорости, определяющие границы области самовозбуждения, меньше синхронной скорости. Так как шахтная распределительная сеть выполняется кабелем, в опытах учитывалось только ее активное сопротивление $R_л$. Реактивное сопротивление распределительной сети, незначительное по сравнению с активным, во внимание не принималось.

**Механическая характеристика двигателя.** Асинхронный двигатель, питающийся через последовательные конденсаторы, при наличии самовозбуждения имеет механическую характеристику, отличающуюся от естественной, так как в некотором диапазоне скоростей машина, работая на частоте сети, одновременно работает генератором на более низкой частоте самовозбуждения. Электромагнитный момент в области самовозбуждения является суммой вращающего момента двигателя и тормозного момента генератора.

Как видно из рис. 1, пусковой и максимальный вращающий моменты машины, включенной через конденсаторы, больше, чем у работающей без конденсаторов. Это объясняется тем, что напряжение на зажимах двигателя увеличивается, а эквивалентное реактивное сопротивление уменьшается. Форма результирующей механической характеристики отличается от естественной наличием впадины в кривой момента. Эта впадина в кривой момента вызвана генераторным тормозным моментом, развиваемым машиной в области самовозбуждения.

Величина максимального генераторного момента и границы области самовозбуждения зависят от параметров машины, емкости конденсаторов и напряжения сети. При данных параметрах и напряжении сети макси-

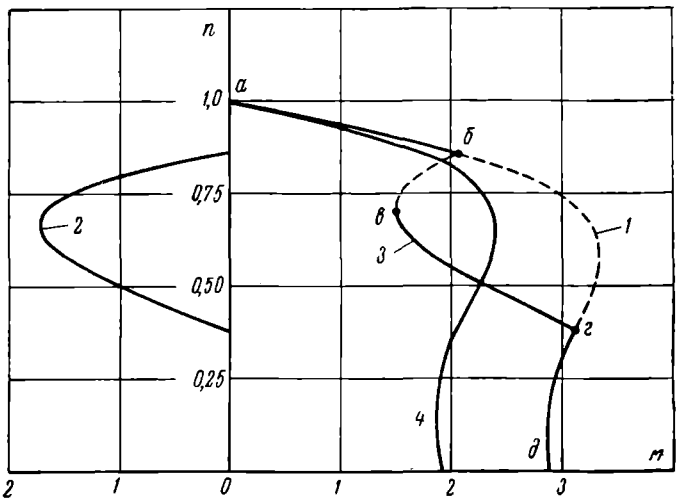



Рис. 1. Механическая характеристика асинхронной машины в относительных единицах при $u = 380$ *в*, $X_C = 10$ *ом*, $R_Л = 0$:

*1* — вращающего момента двигателя в заданном режиме компенсации; *2* — тормозного момента машины в области самовозбуждения; *3* — результирующего момента машины; *4* — естественная при номинальном напряжении на зажимах двигателя.

мальный генераторный момент меньше максимального вращающего момента двигателя, и область самовозбуждения расположена в диапазоне скоростей, меньших синхронной скорости машины (рис. 1).

Так как область самовозбуждения расположена в пределах рабочих скоростей двигателя, необходимо рассмотреть вопрос об устойчивости работы двигателя с исполнительным механизмом. При типовых механических характеристиках устойчивы только ветви *а—б* и *в—г*. Ветвь *а—б* расположена выше верхней критической скорости, поэтому при работе на этой части характеристики самовозбуждения нет, и работа двигателя практически не отличается от обычной. Ветвь *в—г* располагается в области самовозбуждения. Работа на этой части характеристики связана с «застреванием» на пониженной скорости, потреблением значительных токов, а также колебаниями вращающего момента и скорости. Для нормальной работы эта часть характеристики не пригодна. Ветви *б—в* и *г—д* при обычных механических характеристиках производственных механизмов являются неустойчивыми и нерабочими.

**Влияние величины напряжения на механическую характеристику.** При различной величине напряжений форма характеристики, оставаясь в принципе подобной приведенной на рис. 1, несколько изменяется

за счет изменения генераторного и двигательного максимальных моментов и граничных скоростей области самовозбуждения. Как видно из рис. 2, увеличение напряжения и связанное с ним изменение параметров асинхронной машины приводит к сужению области самовозбуждения в основном за счет повышения нижней скоростной границы, определяемой индуктивностью намагничивающего контура. Это подтверждает вывод о влиянии напряжения на скоростные границы области самовозбуждения [Бауман, Иванов, Комаров, 1961].

Из характеристик рис. 2 также видно, что с повышением напряжения величина пускового и максимального двигательных моментов увеличивается. В соответствии с этим протяженность верхней устойчивой ветви характеристики также возрастает. Величина максимального генератор-

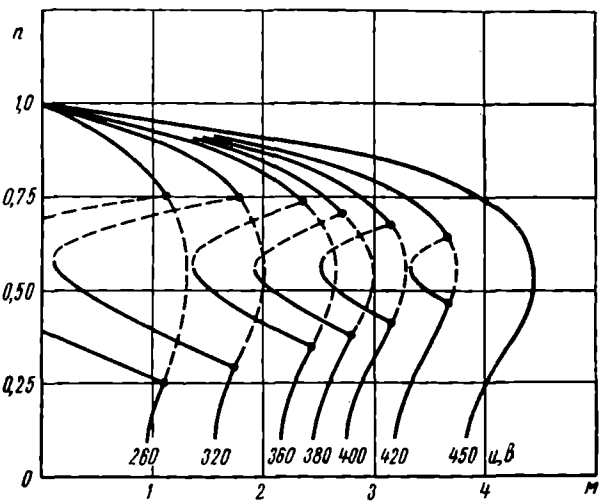



Рис. 2. Механические характеристики АОЛ-31-4 при $X_c = 7$ *ом*, $R_л = 0$.

ного момента с повышением входного напряжения значительно понижается, вплоть до полного исчезновения самовозбуждения, которое наступало в опытах при $u = 450$ *в*. Протяженность нижней устойчивой ветви характеристики при этом уменьшается.

Если напряжение меньше номинального напряжения двигателя, то результирующая характеристика может пересекать ось ординат при скорости, величина которой с уменьшением входного напряжения падает.

**Механические характеристики при изменении величины емкости последовательных конденсаторов.** Увеличение емкостного сопротивления расширяет границы области самовозбуждения в основном за счет повышения верхней критической скорости (рис. 3, *а*). Верхняя устойчивая ветвь характеристики *а—б* при этом сокращается, несмотря на то, что пусковой и максимальный двигательные моменты машины возрастают. Рост моментов обусловлен повышением напряжения на зажимах машины. Величина максимального генераторного момента с увеличением емкостного сопротивления возрастает, нижняя устойчивая ветвь характеристики $в_1—г_1$ увеличивается. В результате при прочих равных условиях вероятность самовозбуждения двигателя также возрастает.

**Механические характеристики двигателя с дополнительным активным сопротивлением в цепи статора.** Включение сопротивления в цепь статора оказывает на самовозбуждение демпфирующее действие. Область само-

возбуждения рис. 3, *б* сужается в основном за счет снижения верхней критической скорости. Максимальный генераторный момент машины резко уменьшается. При некоторой величине сопротивления $R_л = 4$ *ом* генераторный момент исчезает и самовозбуждение отсутствует. Величина пускового и максимального двигательных моментов машины с увеличением активного сопротивления падает. При прочих равных условиях

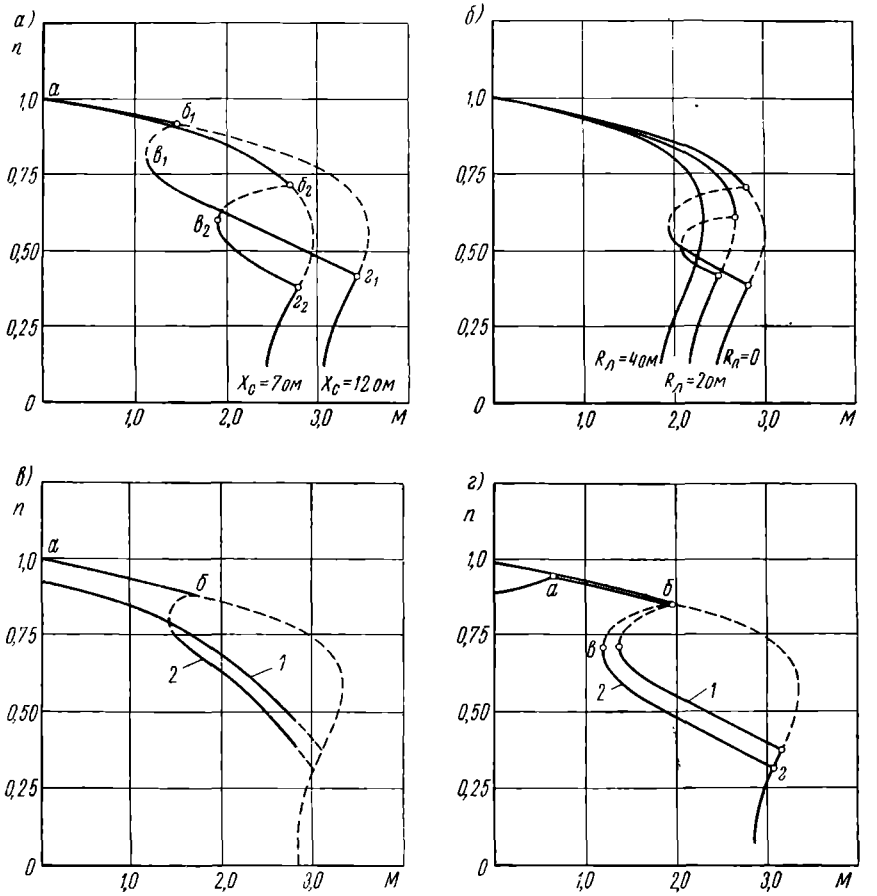



Рис. 3. Механические характеристики АОЛ-31-4 при $u = 380$ *в*: *а* — при различных значениях емкостного сопротивления $X_с$ и $R_л = 0$; *б* — с дополнительным активным сопротивлением $R_л$ в цепи статора и $X_с = 7$ *ом*; *в* — при $X_с = 10$ *ом*, $R_л = 0$ и жестком креплении маховика с валом двигателя:

*1* — $CD^2 = 1{,}5\ GD_{дв}$, *2* — $GD^2 = 2{,}6\ GD_{дв}$; *г* — при $X_с = 10$ *ом*, $R_л = 0$, $GD^2 = 5\ GD_{дв}$: *1* — жесткая связь ротора с маховиком, *2* — поперечный люфт в соединительной муфте в 55°

это объясняется снижением напряжения на зажимах двигателя. При полной компенсации потери напряжения в линии с активным сопротивлением механическая характеристика практически совпадает с естественной при номинальном напряжении на зажимах. Последнее подтверждает возможность улучшения механических свойств асинхронных двигателей при последовательной компенсации в протяженных кабельных распределительных сетях.

**Влияние махового момента на самовозбуждение и механические свойства двигателей.** Как известно [Бауман, Иванов, Комаров, 1961], на характер самовозбуждения оказывают влияние не только рассмотренные

выше факторы, но и маховой момент вращающихся частей. Для выяснения этого влияния проведены исследования асинхронного двигателя с переменным моментом инерции*. Тормозной момент создавался ленточным дифференциальным тормозом, действующим на шкив муфты, момент инерции которой мог изменяться. При исследовании регистрировали средние значения скорости вращения ротора и момента и изучали характер изменения скорости вращения во времени.

Как видно из рис. 3, *в*, при $X_с > 0{,}3\,X_к$ механические характеристики при небольшом моменте инерции (кривая *1*) существенно отличны от характеристик при большем моменте инерции (кривая *2*). Устойчивая ветвь, при работе на которой самовозбуждения не было, здесь отсутствует. Во всем диапазоне наблюдается колебание скорости. Амплитуда скорости наиболее значительна при холостом ходе и зависит от величины напряжения и параметров системы. Колебания, возникающие при скорости вращения ротора более 85% синхронной, не являются следствием обычного самовозбуждения, так как генераторный момент в этом случае отсутствует (см. рис. 1). Колебания ротора могут развиваться постепенно, после нормального разбега и прохождения области самовозбуждения, т. е. являться результатом самораскачивания двигателя.

При номинальном напряжении $u = 380$ *в*, $X_с = 10$ *ом*, $R_л = 0$, $GD^2 = 1{,}56\,GD_{дв}$ средняя скорость двигателя при холостом ходе составляла $n_{ср} = 1385$ *об/мин*. Скорость изменяется почти по синусоидальному закону с частотой $f = 16{,}7$ *гц* и амплитудой в 43 *об/мин*. При меньших напряжениях или под нагрузкой средняя скорость и амплитуда колебаний уменьшаются, а частота колебаний возрастает ($u = 240$ *в*, $f = 28{,}7$ периодов, $n_{ср} = 700$ *об/мин*, амплитуда 28 *об/мин*). При $u = 380$ *в*, $X_с = 10$ *ом*, $R_л = 0$ и $GD^2 = 2{,}6\,GD_{дв}$ механическая характеристика двигателя имеет устойчивую ветвь *а—б*, при работе на которой скорость не колеблется. Увеличение тормозного момента до некоторого значения приводит к обычному самовозбуждению двигателя и работе его на пониженной скорости.

Колебания скорости при этом незначительны и имеют сложный характер изменения во времени. Средняя скорость при тех же значениях момента сопротивления с увеличением махового момента несколько снижается.

При $GD^2 = 5GD_{дв}$ колебаний скорости практически нет. Уменьшение емкостного сопротивления до $X_с < 0{,}3X_к$ устраняет явление самораскачивания. Незначительные колебания скорости в этом случае имеют место лишь в области обычного самовозбуждения машины [Голован, Чжан Чан-Шен, 1962].

Во время исследований обнаружено влияние на процессы самовозбуждения характера связи двигателя с механизмом. Если механизм, создающий дополнительный маховой момент, соединен с валом не жестко, а с люфтом в соединительных муфтах, то при $X_с > 0{,}3\,X_к$ самораскачивание ротора такое же, как при отсутствии дополнительного махового момента.

Как следует из рассмотрения характеристик рис. 3, *г*, колебания скорости в случае нежесткой связи и холостом ходе, при некоторой величине тормозного момента прекращаются (ветвь *а—б*). В дальнейшем в области обычного самовозбуждения двигатель работает на ветви *в—г*. Интересно, что средние скорости в данном случае получаются меньшими, чем при жесткой связи с той же машиной.

---

* Результаты, описанные выше, были получены при исследовании двигателя АОЛ-31-4 с постоянным маховым моментом вращающихся частей, равным $GD^2 = 5GD_{дв}$.

В случае гибкой связи вала двигателя с механизмом, представляющим дополнительный маховой момент, характер изменения результирующего момента машины еще более сложен.

**Особенности развития самовозбуждения нагруженного асинхронного двигателя.** При $X_c < X_к$ область самовозбуждения располагается ниже синхронной скорости. Возможность самовозбуждения при разбеге двигателя в этом случае зависит, с одной стороны, от времени развития колебаний свободного процесса, а с другой, — от времени прохождения области самовозбуждения. Время развития самовозбуждения определяется емкостью, индуктивностью и активным сопротивлением системы. Время прохождения области самовозбуждения при разбеге зависит от момента инерции вращающихся масс и динамического момента, определяемого соотношением вращающего и тормозного моментов на валу. В конечном счете, это время, а следовательно, и возможность самовозбуждения, определяются механической характеристикой рабочего механизма.

Так, например, если характеристика момента сопротивления не выходит из области самовозбуждения, т. е. пересекает только нижнюю устойчивую ветвь *в—г* (см. рис. 1), то самовозбуждение при разбеге нагруженного асинхронного двигателя возникает всегда. Двигатель в этом случае, разбегаясь, достигает скорости, превышающей нижнюю критическую, возбуждается и, затормаживаясь, застревает на ветви *в—г*.

Если характеристика момента сопротивления пересекает обе устойчивые ветви, то самовозбуждение может не развиваться. Двигатель в процессе разбега может пройти область самовозбуждения раньше, чем в системе разовьются свободные колебания, способные создать достаточный для затормаживания ротора генераторный момент. После разбега двигатель будет работать нормально на рабочей части характеристики *а—б*. Самовозбуждение при таких характеристиках момента сопротивления возможно только при небольшой величине динамического момента и малых ускорениях. Последнее может иметь место при запуске двигателей со значительной нагрузкой на валу, пуске на пониженном напряжении, при больших моментах инерции вращающихся масс и при повторном пуске неостановившегося двигателя. Во всех этих случаях двигатель также возбуждается и работает на ветви *в—г*.

Когда характеристика момента сопротивления пересекает только верхнюю устойчивую ветвь, самовозбуждения при разбеге не возникает. При $X_0 > X_c > X_к$ верхняя критическая скорость равна или выше синхронной, поэтому самовозбуждение будет возникать у ненагруженного и нагруженного двигателей в процессе разбега всегда, независимо от вида механической характеристики рабочего механизма.

Увеличение тормозного момента у невозбужденного двигателя, работающего на верхней устойчивой ветви характеристики, приводит к самовозбуждению, когда момент сопротивления на валу превысит вращающий момент, развиваемый на верхней критической скорости. В этом случае двигатель попадает в область самовозбуждения, развивается генераторный тормозящий момент, скорость вращения снижается и двигатель застревает в режиме самовозбуждения на нижней устойчивой ветви характеристики. Условия возникновения самовозбуждения при увеличении нагрузки зависят от соотношения моментов, развиваемых машиной на верхней и нижней границах области самовозбуждения. Если момент, соответствующий верхней критической скорости (рис. 3, *а*, точка $б_1$), значительно меньше момента при нижней критической скорости (точка $г_1$), то вероятность самовозбуждения возрастает. Оно может возникать даже при характеристиках момента сопротивления со значительным углом наклона к оси моментов.

Если же параметры системы таковы, что момент, соответствующий верхней критической скорости (рис. 3, *а*, точка $б_2$), равен или больше момента при нижней критической скорости (точка $г_2$), то самовозбуждение будет только при характеристиках момента сопротивления с небольшим углом наклона к оси моментов. Такие характеристики можно получить, например, при электродинамическом торможении. У производственных механизмов характеристики момента сопротивления обычно значительно отличаются от характеристик электродинамического торможения. В этих условиях соответствующим выбором емкости возможность самовозбуждения можно исключить.

Наличие в системе активных сопротивлений, уменьшает генераторный момент. Поэтому вероятность самовозбуждения в этом случае уменьшается при любой форме характеристики момента сопротивления.

## Выводы

1. Характеристика вращающего момента асинхронного двигателя при питании через последовательные конденсаторы отличается от естественной.

2. Входное напряжение оказывает существенное влияние на механическую характеристику двигателя. При повышении напряжения вероятность самовозбуждения уменьшается.

3. Увеличение емкостного сопротивления приводит к значительному изменению механической характеристики в основном за счет увеличения генераторного момента. Вероятность самовозбуждения при этом возрастает.

4. В линиях с активным сопротивлением изменение механической характеристики выражено менее резко. Вероятность самовозбуждения существенно снижается. При определенной величине емкости самовозбуждение вообще отсутствует, а характеристика вращающего момента, несмотря на наличие линии сопротивления, практически не отличается от естественной.

5. При малых маховых моментах вращающихся частей и определенной величине емкости наблюдается самораскачивание ротора асинхронного двигателя со значительными колебаниями скорости вращения относительно средней скорости ротора. Последнее наблюдается и при скоростях, превышающих верхнюю критическую скорость обычной области самовозбуждения. Величина махового момента оказывает влияние на колебания ротора и среднюю его скорость не только при самораскачивании, но и в области самовозбуждения. На величину средней скорости, особенно при самораскачивании ротора, влияет и характер связи машины с инерционным механизмом.

6. Самовозбуждение возможно как при разбеге, так и при увеличении нагрузки нормально разогнавшегося двигателя. Развитие самовозбуждения зависит от характера момента сопротивления.

## ЛИТЕРАТУРА

Бауман В. Г., Иванов О. В., Комаров Б. И. Самовозбуждение асинхронных двигателей с последовательными конденсаторами. Электричество, № 5, 1961.

Бауман В. Г., Иванов О. В., Комаров Б. И. К вопросу об эффективности применения последовательных конденсаторов для компенсации потерь напряжения в рудничных распределительных сетях. Электричество, № 1, 1962.

Голован А. Т., Чжан Чан-Шен. Механическое качание асинхронной машины при ее работе с последовательно включенными конденсаторами. Электричество, № 10, 1962.