

АНАЛИЗ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ ОТ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Ченчевой В.В., асп., Зачена Ю. В., ст. преподаватель, Рыков Г. Ю., ст. преподаватель, Колотий А.О., магистрант

Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600

E-mail: saue@kdu.edu.ua

Введение. Автономные источники электроэнергии (АИЭ) становятся все более популярными при решении вопросов электроснабжения бытовых и промышленных потребителей. АИЭ должны отвечать целому ряду требований: экономичность, надежность, большой срок службы, простота и удобство эксплуатации, малые масса и габариты. В связи с этим перспективной выглядит замена традиционно используемых в автономных электростанциях синхронных генераторов на асинхронные. Несмотря на специфические особенности асинхронных генераторов (АГ), такие как наличие верхней и нижней критической скорости самовозбуждения, минимального и максимального критических значений емкости возбуждения, они обладают рядом преимуществ – небольшие габаритные размеры при достаточно большой мощности, возможность автономной работы, высокая прочность и устойчивость к центробежным нагрузкам. Преимуществами асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением на базе асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором являются простота конструкции и технологии изготовления, высокая эксплуатационная надежность, значительная распространенность асинхронных машин. Долгое время считалось, что использование асинхронного генератора в автономном режиме связано с большими сложностями, а потому не является целесообразным. Если проблема значительной массы и большой стоимости конденсаторов возбуждения в настоящее время решена, то вопрос создания простой и надежной системы стабилизации выходного напряжения асинхронного генератора остается открытым. Все известные на сегодняшний день способы регулирования напряжения асинхронного генератора имеют определенные недостатки, в результате, область применения таких генераторов ограничена. Одна из основных проблем при разработке автономных источников электроэнергии на базе асинхронного генератора состоит в выборе рациональной системы его возбуждения и стабилизации выходного напряжения, обеспечивающие оптимальные эксплуатационные характеристики. Особенно это

касается потребителей – электрических приводов с АД, когда мощности АГ и АД соизмеримы. В таких автономных системах запуск АД от АГ соизмеримой мощности приводит к изменению параметров пускаемого двигателя (момента и угловой скорости), а следовательно, влияет на работу самого генератора. При решении вопроса о предельно допустимой мощности двигателя по условиям пуска или самозапуска, следует исходить из допустимого снижения напряжения у выводов двигателя и на шинах, от которых питаются другие приемники энергии. При этом напряжение на выводах пускаемого двигателя должно быть достаточным, чтобы обеспечить положительный избыточный момент в течение всего процесса разгона при допустимом нагреве обмоток. Более глубокое снижение напряжения в месте включения цепи двигателей и остальной нагрузки (на общих шинах) при небольшой продолжительности в некоторых случаях оказывается предпочтительнее. Чем меньше, но продолжительное понижение напряжения не успевают сколько-нибудь значительно повлиять на нормальную работу остальных потребителей. Чем больше напряжение на выводах двигателя при пуске под нагрузкой, тем меньше время разгона и нагрев его обмоток. Допустимое снижение напряжения на общих шинах при пуске или самозапуске двигателя определяется с учетом характера нагрузки.

Поэтому основными требованиями, предъявляемыми к этим системам в таком режиме, являются: минимальное изменение (провал) напряжения, минимальное время восстановления.

Цель работы. Исследование переходных процессов при пуске асинхронных двигателей от энергоустановок ограниченной мощности на базе асинхронного генератора с емкостным возбуждением. Важным является вопрос определения максимальной мощности пускаемого двигателя.

Материал и результаты исследования. Согласно [1] алгебраическая сумма реактивных мощностей автономной системы асинхронный генератор – нагрузка равна:

$$\sum_{k=1}^n Q_k = 0.$$

В общем случае реактивная мощность конденсаторных батарей равна сумме реактивных мощностей генератора и нагрузки:

$$Q_c = \frac{U^2}{x_c} = Q_2 + Q_H = P_2 \cdot \operatorname{tg} f_2 + P_H \cdot \operatorname{tg} f_H,$$

где U_c – модуль линейного напряжения на зажимах конденсаторной установки, которое определяется напряжением на зажимах АГ ($U_c = U_2$); P_2 , P_H – номинальные активные мощности генератора и его нагрузки.

Для асинхронных двигателей общепромышленного исполнения во время пуска вплоть до критического скольжения, $\cos \varphi_{\text{пуск}} = 0,4 \dots 0,5$. Таким образом, в процессе пуска двигатель представляет собой большую нагрузку индуктивного характера и нагружает автономный генератор реактивной мощностью. Исходя из этого, максимальная мощность пускаемого двигателя от асинхронного генератора определяется следующим образом:

$$P_{\text{max}} = \frac{\left(\frac{U_c}{K_U}\right)^2 \cdot \omega_0 \cdot C_{\text{max}} - P_2 \cdot \operatorname{tg} f_2}{\operatorname{tg} f_{\text{пуск}}},$$

где $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_c$, K_U – коэффициент, учитывающий снижение потребления генератором реактивного тока при провале напряжения во время пуска АД, C_{max} – максимальная величина емкости, подключаемая к АГ, f_c – частота генерируемого напряжения.

Принимая во внимание то, что скорость вращения ротора АГ является величиной постоянной (соответствует допущению бесконечной мощности приводного двигателя):

$$C_{\text{max}} = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot (L_1 + L_2')}.$$

Для реальных значений параметров асинхронных машин различного исполнения величина отношения мощности пускаемого двигателя и генератора лежит в пределах:

$$p = \frac{P_{\text{max}}}{P_2} \approx 0,2 \div 0,3. \quad (1)$$

Рассмотрим возможность прямого пуска асинхронного двигателя от асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением.

Для анализа переходных процессов в АГ была создана математическая модель в трехфазной системе координат [4]. На рис. 1 – 2 представлены результаты исследований в режиме подключения к АГ в качестве

нагрузки АД (мощность асинхронного генератора и асинхронного двигателя соответственно: $P_{\text{АГ}}=4$ кВт,

$P_{\text{АД}}=250$ Вт). В данном случае $\frac{P_{\text{АД}}}{P_{\text{АГ}}} = 0,0625$, т. е.

АГ выступает как источник неограниченной мощности.

При питании АД от генератора, процесс изменения напряжения во время пуска двигателя происходит следующим образом: в первый момент после включения двигателя напряжение на шинах генератора уменьшается, т.к. в процессе пуска АД представляет собой большую нагрузку индуктивного характера и нагружает асинхронный генератор реактивной мощностью.

При отсутствии на генераторе системы управления возбуждением напряжение на выходе генератора начнет уменьшаться вследствие размагничивания генератора пусковыми токами. Время пуска двигателя больше времени переходного процесса размагничивания генератора, поэтому после окончания переходного процесса на генераторе установится некоторое значение напряжения, которое всегда будет ниже, чем начальное значение напряжения в момент пуска двигателя.

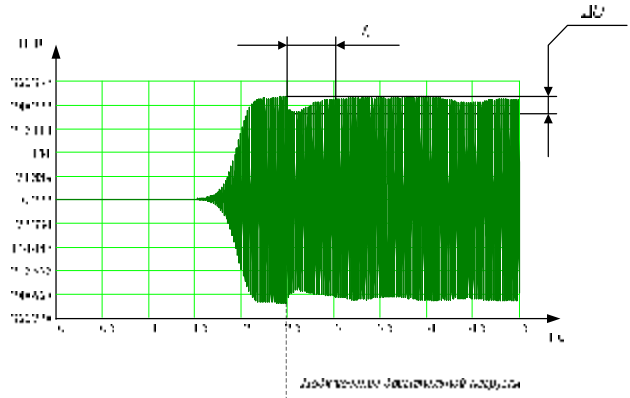


Рисунок 1 – Временные диаграммы выходного напряжения АГ при подключении двигательной нагрузки

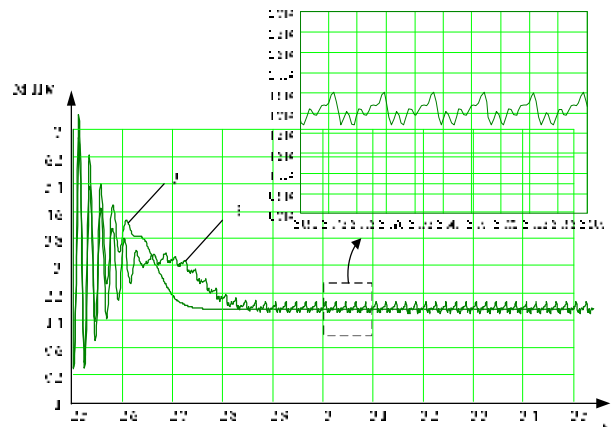
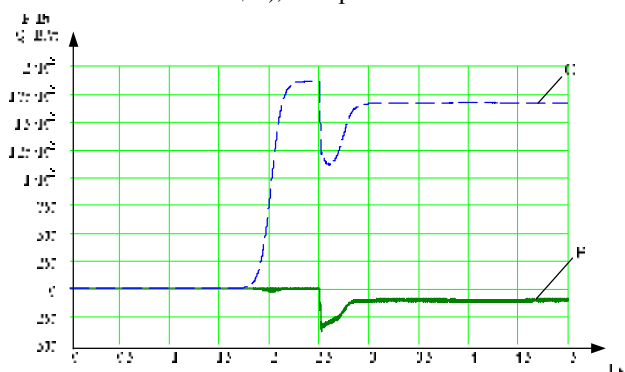
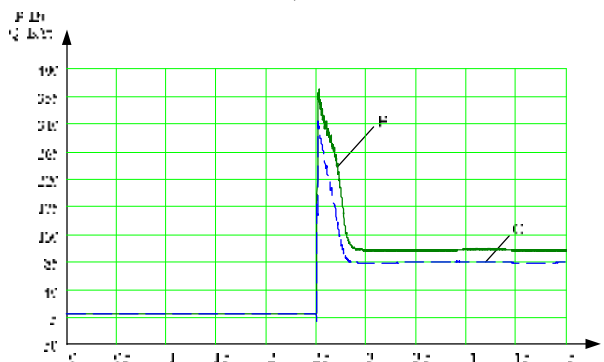


Рисунок 2 – Временные диаграммы момента АД:

1 - при питании идеальным напряжением (не содержащим в составе высших гармонических составляющих), 2 – при питании от АГ



а)



б)

Рисунок 3 – Переходный процесс активной и реактивной мощностей АГ, а) и АД, б)

На последнем этапе разгона двигателя пусковой ток резко уменьшается и одновременно повышается коэффициент мощности. Все это приводит к повышению напряжения генератора.

Устойчивость переходного процесса при пуске двигателя зависит от величины возмущающего воздействия, которым в данном случае является ток нагрузки. Электромагнитные процессы, приводящие к потере возбуждения, проходят за 2-3 периода колебаний напряжения, а восстановление возбуждения может длиться от нескольких до десятков секунд. Поэтому очень важно контролировать начальную величину ударного тока.

Так, на рис. 4 приведены результаты исследований пуска АД различной мощности. В качестве АГ использовалась асинхронная машина с к.з. ротором мощностью $P_{AG}=1,2$ кВт. Мощность же испытуемых машин принималась с учетом соотношения (1) и соответствует 250, 370 и 560 Вт.

В случае с АД 250 Вт, что соответствует соотношению мощностей $p=0,2$, видно, что пуск АД осуществлен удачно, при этом напряжение питания, выдаваемое АГ с емкостным возбуждением, в момент подключения нагрузки характеризуется кратковременным снижением действующего значения

на 34%, что допустимо для автономных источников энергии ограниченной мощности согласно ГОСТ 13822-82. Это объясняется тем, что пусковые токи для машин с таким соотношением мощностей меньше номинального тока генератора. Поэтому размагничивание асинхронной машины, используемой в качестве источника энергии, не происходит.

При попытке пуска двигателя 560 Вт, номинальный ток которого близок к номинальному току генератора, пусковые токи значительно превышают перегрузочные способности генератора, и происходит быстрая потеря возбуждения. На рис. 6 представлены результаты математического моделирования пуска АД мощностью 560 Вт (соотношение мощностей $p=0,5$).

Пуск двигателя в автономных системах в таком случае возможен лишь с использованием пуско-регулирующих устройств [7].

Промежуточным вариантом является случай, когда ударные пусковые токи приводят к такому падению напряжения АГ, что двигатель «застревает» на малой скорости вращения, а дальнейший разгон станет возможным только после возобновления прежних условий возбуждения АГ. Так, на рис. 4 представлены результаты исследований пуска асинхронного двигателя мощностью 370 Вт (граница устойчивости процесса самовозбуждения АГ). В данном случае наблюдается затягивание процесса пуска АД в 8-9 раз по сравнению с «благоприятным» условием пуска.

Для улучшения пусковых характеристик и увеличения мощностей подключаемого электрооборудования к зажимам автономной генераторной установки, необходимо ограничивать или компенсировать действия знакопеременного ударного момента при подключении двигателя.

В настоящее время пуск двигателя с управлением электромагнитными переходными моментами можно осуществить различными способами, например, приведенными в [5].

Одним из них является уменьшение скорости нарастания приложенного напряжения. Для источников энергии на базе АГ с емкостным возбуждением указанный способ реализуется достаточно сложно, так как в этом случае напряжение на зажимах асинхронной машины является функцией двух переменных – емкостного тока (изменение емкости конденсаторной батареи) и скольжения (изменение скорости вращения АГ посредством первичного двигателя). Необходимо учитывать, что при этом уменьшается рост вынужденной составляющей потока, что может привести к уменьшению среднего пускового момента двигателя.

Ограничение переходных моментов возможно путем уменьшения скорости нарастания магнитного потока. Это достигается уменьшением приложенного к двигателю напряжения и реализуется несколькими

способами: переключение обмоток со звезды на треугольник, использование пускового автотрансформатора, включение в цепь статора пусковых резисторов [6].

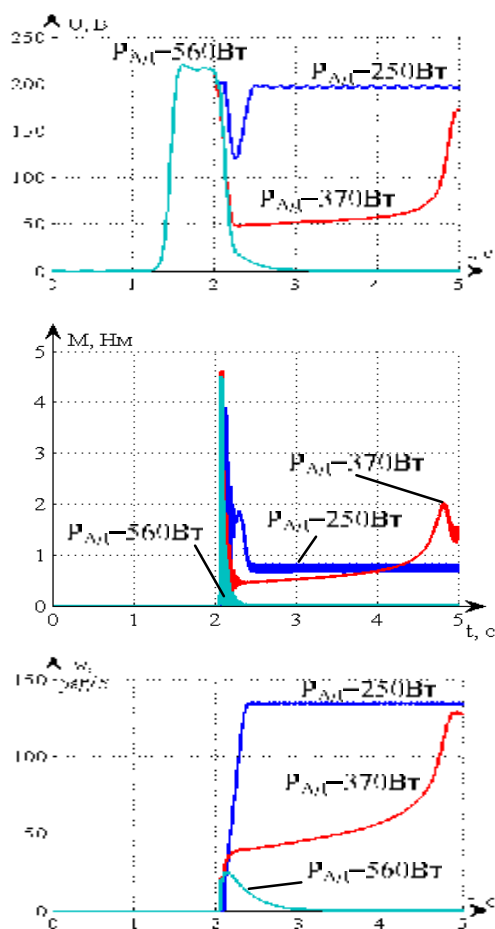


Рисунок 4 – Зависимости огибающих напряжения АГ, момента и скорости АД при прямом пуске двигателей 250, 370, 560 Вт

На рис. 5 приведены результаты исследования процесса пуска АД с использованием автотрансформатора, применение которого позволяет уменьшить более чем в 2 раза значение переходных моментов, что обеспечивает нормальный запуск АД без потери возбуждения асинхронного генератора. Однако при этом часть энергии тратится на активных сопротивлениях пускового трансформатора, что приводит к снижению уровня напряжения на 5-7% и появлению статической ошибки по скорости вращения $\Delta\omega = 7,5\%$.

Уменьшение скорости изменения магнитного потока и переходной составляющей тока намагничивания осуществляется за счет предварительного, до подключения двигателя к сети, создания магнитного потока, который мало отличается по амплитуде и фазе от своего установившегося значения. В этом случае электропривод приобретает

новое свойство – знакопеременные переходные моменты практически полностью ограничиваются без снижения быстродействия. Такой режим получил название создание ненулевых начальных электромагнитных условий.

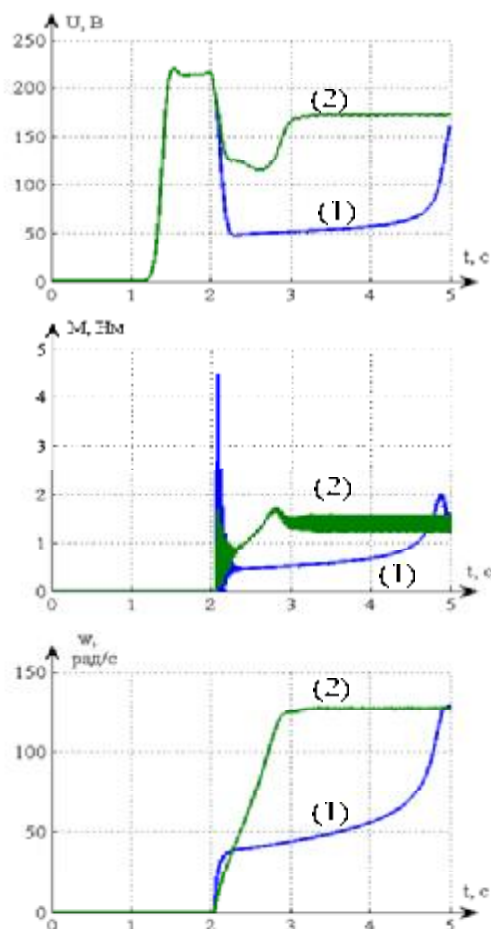


Рисунок 5 – Зависимости огибающих напряжения АГ, момента и скорости АД мощностью 370 Вт при прямом пуске (1) и с автотрансформатором (2)

Для создания «благоприятных» условий пуска асинхронных двигателей рассмотрим процесс создания знакопеременных ударных моментов.

После включения токи статора и ротора равны сумме установившихся и свободных токов.

$$\left. \begin{aligned} \bar{i}_c &= \bar{I}_c e^{j\omega t} + \bar{I}_{c_1} e^{a_1 t} + \bar{I}_{c_2} e^{a_2 t} \\ \bar{i}_p &= \bar{I}_p e^{j\omega t} + \bar{I}_{p_1} e^{a_1 t} - \bar{I}_{p_2} e^{a_2 t} \end{aligned} \right\}$$

где \bar{I}_c , \bar{I}_p – установившиеся значения токов статора и ротора.

Момент двигателя описывается выражением:

$$M = \frac{3}{2} L_m (I_p e^{j\omega t} + I_{p_1} e^{a_1 t} - I_{p_2} e^{a_2 t}) \times \\ \times (I_c e^{j\omega t} + I_{c_1} e^{a_1 t} + I_{c_2} e^{a_2 t}) = M_1 + M_2 + M_3$$

Рассмотрим отдельные слагаемые момента:

– установившееся значение вращающего момента [5]:

$$M_1 = \frac{3}{2} L_m (\bar{I}_p e^{j\omega t}) \times (\bar{I}_c e^{i\omega t}) = \frac{3}{2} L_m I_p \times I_c = M_{II}.$$

Эта составляющая представляет собой пусковой момент в установившемся режиме или момент короткого замыкания, т. е. момент, который будет развивать двигатель с заторможенным ротором после окончания переходных процессов. После того как двигатель начинает вращаться, эта составляющая момента изменяется, поскольку параметры зависят от скольжения;

– апериодическая составляющая момента, как показано в [7]:

$$M_2 = -M_{II} e^{(a_1+a_2)t}.$$

Эта составляющая быстро затухает. Фактически, рассматривая совместно сумму $M_1 + M_2$ можно отметить быстрое экспоненциальное нарастание движущего момента от 0 до значения, соответствующего механической характеристике с учетом скорости изменения скольжения. При этом:

$$M_{об} = M_1 + M_2 = M(w)k_d(1 - e^{(a_1+a_2)t}).$$

Таким образом, анализ первых двух составляющих момента показал, что при подключении асинхронного двигателя к источнику, на его зажимах возникает полезный вращающий момент, соответствующий механической характеристике;

– знакопеременные составляющие момента.

Основные слагаемые момента – пульсирующие. Они образованы в результате совместного действия экспоненциально затухающих и установившихся синусоидальных токов статора и ротора – качающихся полей,

$$M_3 = \frac{M_{II}}{\cos f_K} (\cos(\omega t - f_K) e^{a_1 t} + \cos(\omega t + f_K) e^{a_2 t}).$$

Первое из слагаемых затухает медленно, второе – быстро, причем оба пульсируют с частотой сети. Если записать выражение для суммы колебательных моментов с учетом того, что скорость ротора изменяется, то оно приобретает следующий вид:

$$M_3 = M'_1 e^{a_1 t} \sin(\omega_1 t - f_1) + M'_2 e^{a_2 t} \times \sin(\omega_2 t - f_2) + M'_3 e^{(a_1+a_2)t} \times \sin((\omega_2 - \omega_1)t - f_3)$$

Физически первая составляющая знакопеременного момента представляет собой результат действия качающегося поля, созданного потоком апериодического тока одной из фаз статора и потоком периодических токов двух других фаз статора. Вторая составляющая возникает в результате действия качающегося поля реакции ротора. В самом начале процесса обе эти составляющие имеют одинаковую частоту, равную частоте сети.

При одновременном включении фаз статора указанные явления не наблюдаются. Это объясняется

тем, что суммарное поле апериодических составляющих токов зависит от момента подключения отдельных обмоток к зажимам питающей сети [6]. Действительно, значение апериодической составляющей тока каждой обмотки статора зависит от фазового угла подключения этой обмотки к сети. Если подключить обмотки таким образом, чтобы апериодические составляющие тока не возникали, то не возникнут и качающиеся поля, а значит, не возникнут и ударные знакопеременные моменты. Условием равенства нулю апериодических составляющих токов является подключение каждой обмотки в области максимума соответствующего напряжения – так называемое "благоприятное" включение.

На рис. 6-8 показаны осциллограммы напряжений и моментов, соответствующие благоприятному и неблагоприятному подключению.

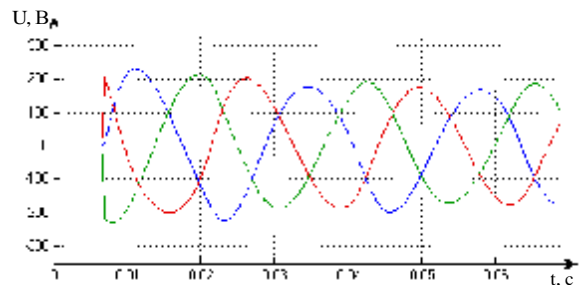


Рисунок 6 – Фазные напряжения в момент подключения при прямом пуске АД

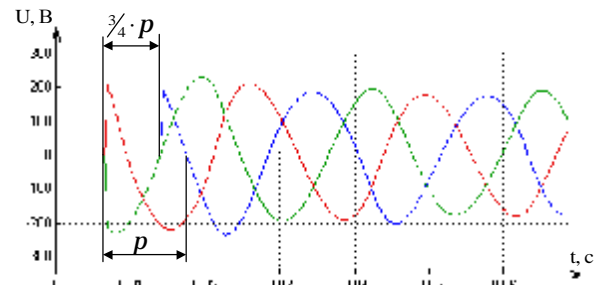


Рисунок 7 – Фазные напряжения в момент подключения при пуске АД при подключении фазы А с задержкой

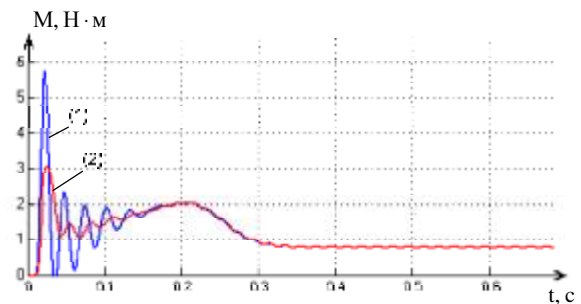


Рисунок 8 – Переходные процессы момента и скорости при прямом пуске АД (1) и при подключении фазы А с задержкой (2)

При благоприятном подключении осциллограмма момента соответствует статической механической характеристике двигателя с учетом скорости изменения скольжения, знакопеременные моменты отсутствуют. Значение максимального момента снижается практически в 2 раза и колебания его значительно меньше.

Выводы. Таким образом, разработанная математическая модель системы АГ – АД позволяет исследовать переходные процессы при пуске АД. В работе доказано, что максимально допустимая мощность асинхронных машин при прямом пуске, при которой энергогенерирующая установка обеспечивает условия нормального пуска, лежит в пределах 0,2-0,3 от мощности используемого АГ.

Также, на основе проведенных исследований, можно заключить, что улучшение пусковых характеристик асинхронных двигателей в условиях генерирующих устройств ограниченной мощности возможно при ограничении знакопеременных ударных моментов, возникающих при подключении двигателя к питанию.

Из всех возможных способов устранения этого нежелательного эффекта, наиболее рациональным является система создания ненулевых начальных условий. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят определить принципы построения систем стабилизации выходного напряжения АГ при действии различных по значению и характеру возмущающих факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вишневецкий Л.В., Пасс А.Е. Системы управления асинхронными генераторными комплексами / Л.В. Вишневецкий, А.Е. Пасс. – К.: Лыбидь. – 1990. – 168 с.
2. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. / В.А. Балагуров. – М.: Высш. школа. – 1982. – 272 с.
3. Вишневецкий Л.В., Муха Н.И. Постоянные времени асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением / Л.В. Вишневецкий, Н.И. Муха // Электромашинобудовання та електрообладнання Вип. 53, 1999. – С. 74 - 75.
4. Ченчевой В.В. Математическая модель асинхронного генератора с релейным регулятором емкостного тока / В.В. Ченчевой // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета: Вып. 6/2008 (53), Ч. 2. – С. 35-39.
5. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей / Л.П. Петров. – М.: Энергоиздат. – 1981. – 184 с. ил.
6. Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода / И.И. Петров, А.М. Мейстель. – М.: Энергия. – 1968. – 264 с.
7. Смирнов М.И. Пуско-регулирующее устройство на базе статического компенсатора реактивной мощности: автореф. на соиск. науков. степени канд. техн. наук: спец. 05.09.01. "Электромеханика и электрические аппараты" / М.И. Смирнов. – М., 2007. – 20 с.

