

УДК 621.316.91

В. С. МАРКОВ, И. В. ПОЛЯКОВ

К ПРОЦЕССУ ВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Статья посвящена проблеме возбуждения асинхронных генераторов. Рассматривается традиционный подход к процессу самовозбуждения и, самовозбуждение, как автоколебательный процесс в системе асинхронный двигатель – конденсатор, что позволяет уменьшить мощность возбуждения или емкость конденсаторов возбуждения. Рассматривается влияние взаимной индуктивности обмоток статора и ротора на процесс самовозбуждения.

Ключевые слова: асинхронный генератор, возбуждение асинхронного генератора, автоколебания в системе асинхронный генератор – конденсатор.

Актуальность. В последние годы усиливается тенденция к использованию асинхронного генератора (АГ) в качестве силовой установки, особенно, на ветроэлектростанциях (ВЭС) [1,2]. Достоинства АГ – надежность, стабильность работы на сеть, отсутствие опасности выпадения из синхронизма перекрываются серьезным недостатком, а именно, для самовозбуждения АГ требуется источник реактивной мощности, например, конденсаторная батарея или синхронный компенсатор (рис. 1), где M_B – внешний механический момент, Z_H – полное сопротивление нагрузки. Кроме того, в процессе работы на нагрузку, АГ требуются компенсирующие конденсаторы. Таким образом, уменьшение затрат на возбуждение АГ является серьезной научно-практической задачей.

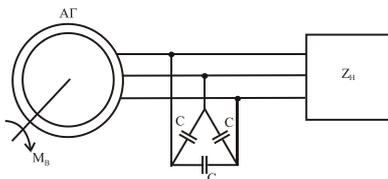


Рис. 1 – Включение конденсаторной батареи в фазы обмотки статора АГ

Анализ исследований и публикаций. Традиционный подход к процессу самовозбуждения АГ подробно изложен И.П.Копыловым в [3]. Процесс самовозбуждения АГ можно представить следующим образом. При вращении ротора генератора с частотой, близкой к номинальной, за счет остаточного намагничивания ротора наводится ЭДС $E_{ост}$ (рис. 2). Эта ЭДС наводит в цепи конденсаторов и машины ток I_C , который усиливает поле машины и создает ЭДС E_1 . Далее токи и МДС возрастают, пока их значения не установятся в точке пересечения характеристики холостого хода генератора с вольт-амперной характеристикой цепи конденсаторов ($X_C I_C$) и не станут равными току I_1 и ЭДС E_1 (рис. 2). Напряжение на генераторе зависит от емкости конденсаторов: чем меньше емкость, тем больше угол α (рис. 2). При небольших значениях емкости вольт-амперная характеристика $X_C I_C$ не пересекается с характеристикой холостого хода АГ и машина не возбуждается. Напряжение на генераторе зависит также от вида характеристики намагничивания. Изменяя насыщение АГ, можно при постоянной емкости конденсаторов регулировать напряжение на выводах генератора. Изменять насыщение магнитной

системы генератора удобно путем подмагничивания спинки статора постоянным током. Изменять плавно емкость силовых конденсаторов трудно. Поэтому при плавном регулировании напряжения АГ в цепь конденсаторов последовательно включается реактор и за счет изменения его индуктивности осуществляется регулирование реактивной мощности в системе и напряжение на генераторе. В АГ, работающем параллельно с сетью, частота задается сетью и не изменяется при изменении режима работы АГ. В АГ, работающем в автономной системе, частота напряжения зависит как от частоты вращения ротора, так и от параметров генератора и элементов автономной системы. Значительные габариты конденсаторов и громоздкие схемы регулирования ограничивают применение АГ в автономных системах.

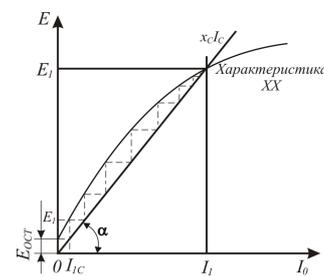


Рис. 2 – К самовозбуждению АГ

Также в научной литературе существует подход к самовозбуждению АГ, как к процессу автоколебаний. Например, в [4] утверждается, что устройство «асинхронная машина – емкость» в структурном отношении, по принципам действия и свойствам представляет собой типичную автоколебательную систему (рис. 3).



Рис. 3 – Структурная схема типичной автоколебательной системы

Поступление энергии в такт колебаниями контура обеспечивается роторной цепью до тех пор, пока сохраняются условия выполнения требований баланса амплитуды и фазы. Толчок к началу самовозбуждения этой системы нужен только в случае, если по тем или иным причинам режим

работы устройства пришелся на зону частотного гистерезиса, причем наиболее надежный толчок обеспечивается за счет импульса предварительно заряженной конденсаторной батареи. Если же режим работы машины выбран в зоне уверенного возбуждения, то она возбуждается мягко, и к первопричине колебаний не должно предъявляться каких-либо требований, поскольку роль первоначального импульса может сыграть ничтожно малая внешняя наводка или флуктуация контура. Поскольку рост возникающих при самовозбуждении колебаний ограничивается на уровне, определяемом насыщением машины, то, следовательно, «асинхронная машина – емкость» – типично нелинейная система. Что касается практических мер по обеспечению самовозбуждения АГ, то условия энергетического баланса и малого затухания контура (колебательный режим его работы) заставляют стремиться к уменьшению активных сопротивлений машины. Границы зоны самовозбуждения (нижняя и верхняя критическая частота вращения ротора):

$$\Omega_{\text{кн}} = \frac{1}{p\sqrt{L_0 C}} \left(1 + \frac{r_1 r_2 C}{L_0} \right), \quad \Omega_{\text{кв}} = \frac{r_1 + r_2}{p r_1} \sqrt{\frac{1}{(L_1 + L_2) C}} \quad (1)$$

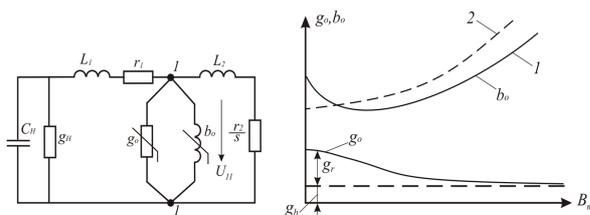


Рис. 4 – Т-образная схема замещения одной фазы АГ и зависимости g_0 , b_0 от B_m

Широко распространена точка зрения, что причиной возбуждения АГ является остаточное намагничивание ротора машины и возникновение в обмотке статора начальной ЭДС синхронной частоты. Эта точка зрения противоречит ряду экспериментов [5], показывающих возможность самовозбуждения генератора при полном начальном размагничивании ротора или даже при выполнении его из немагнитного материала. При этом оказывается, что остаточное намагничивание, тем не менее, влияет на условия возбуждения и при намагниченном роторе возбудить машину легче, чем при его полном размагничивании. В [5] показано, что причиной самовозбуждения АГ являются колебания, возникающие в системе с отрицательным сопротивлением на частотах, соответствующих балансу амплитуд и фаз или реактивных и активных мощностей основной гармонической составляющей автоколебаний в нелинейной системе. На рис.4 показана эквивалентная Т-образная схема замещения одной фазы автономного АГ, ротор которого вращается с угловой частотой ω_r , а к зажимам статора подключена симметричная активно-емкостная нагрузка g_n , C_n . Возбуждение генератора наступает при некоторой частоте тока статора ω , создающего вращающееся магнитное поле. При этом напряжение между зажимами 1–1 в

эквивалентной схеме может быть отлично от нуля только при равенстве нулю комплексной проводимости \underline{Y} между этими точками. Таким образом, условием самовозбуждения генератора служит равенство

$$\underline{Y} = g_0 - jb_0 + \frac{1}{r_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{g_n + j\omega C_n}} + \frac{1}{\frac{r_2}{s} + j\omega L_2} = 0, \quad (2)$$

выполнимое только при отрицательном скольжении.

Активная и индуктивная проводимости представляют собой те нелинейные элементы цепи, которые ограничивают амплитуду автоколебаний или напряжение самовозбуждения генератора. Наиболее существенен для возбуждения генератора вид характеристики $b_0(B_m)$. При синусоидальном изменении индукции во времени кривая $b_0(B_m)$ имеет немонотонный характер (кривая 1, рис. 4 б). В области малых значений B_m (релеевская область характеристики стали) эквивалентная индуктивность мала, следовательно, значение b_0 велико. С ростом амплитуды изменения магнитной индукции индуктивность растет и b_0 уменьшается, а по мере перехода в область насыщения стали индуктивность уменьшается, и b_0 растет. В случае мягкого возбуждения автоколебаний, при любых начальных условиях устанавливается автоколебательный режим. В случае жесткого возбуждения АГ, возбуждение возможно только при кратковременном изменении параметров, причем остаточное намагничивание ротора оказывает лишь косвенное воздействие на возбуждение АГ.

В [6] указывается, что роль условного «стартера» в генераторе может выполнить не только остаточная индукция ротора, но и остаточная индукция статора. Поскольку статор АГ выполнен из электротехнической стали, то его остаточная индукция не равна нулю, при условии, что АГ хотя бы раз находился в работе. В [7] утверждается, что «стартеры», обусловленные несимметрией ротора, не оказывают влияния на значение емкости конденсаторов, при котором наступает самовозбуждение АГ. Это объясняется тем, что на начальном этапе самовозбуждения данные «стартеры» не создают значительных намагничивающих токов. В этом случае автогенераторные условия самовозбуждения, т.е. условия, при которых генератор теряет устойчивость, определяются значением взаимной индуктивности АГ при намагничивающем токе равном нулю. Эти «стартеры» создают только первоначальный импульс (толчок), который при наличии положительной обратной связи, в дальнейшем усиливается, что и приводит, в конечном счете, к конденсаторному самовозбуждению АГ.

Эквивалентное комплексное сопротивление схемы замещения (рис. 4) без учета g_n относительно взаимной индуктивности M обмоток равно

$$Z_{\text{эв}} = R_{\text{эв}} + jX_{\text{эв}} = \frac{\left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_n} \right) \right] \left[\frac{r_2}{s} + j\omega L_2 \right]}{\left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_n} \right) \right] + \left[\frac{r_2}{s} + j\omega L_2 \right]} \quad (3)$$

Комплексный коэффициент обратной связи (ОС) в АГ равен обратному значению комплексного сопротивления, по которому протекает намагничивающий ток (ток обратной связи), т.е.

$$K_{oc} = \frac{1}{Z_{эвк}} = \frac{\left(r_1 + \frac{r_2}{s} \right) + j \left(\omega L_1 + \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_H} \right)}{\left[r_1 \frac{r_2}{s} - \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_H} \right) \omega L_2 \right] + j \left[r_1 \omega L_2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_H} \right) \frac{r_2}{s} \right]} \quad (4)$$

В свою очередь комплексный коэффициент усиления АГ, равный

$$K_y = -\frac{1}{Z_{эвк}} = -j\omega M = -j \frac{p\Omega_p}{1-s} M, \quad (5)$$

где p – число пар полюсов АГ;
 Ω_p – угловая скорость ротора.

Возникновение колебаний в АГ возможно, если $K_{oc} K_y > 1$, что является автогенераторным условием самовозбуждения АГ. По мере приближения к установившемуся режиму коэффициент усиления начинает уменьшаться за счет влияния нелинейности до тех пор, пока не наступит равновесие, т.е. установившийся режим самовозбуждения и

$$K_{oc} K_y = 1 \quad (6)$$

Это равенство выполняется при соблюдении баланса амплитуд и фаз и соблюдается в момент нарушения устойчивости.

Постановка задачи. Воспользовавшись моделью автономного АГ в составе ветротурбины из [8] (рис. 5), уменьшить мощность возбуждения АГ, работающего в автономной системе, и проверить, возможно ли, возникновение автоколебательного процесса, т.е. возбуждения АГ. При этом следует учесть влияние на процесс самовозбуждения АГ взаимной индуктивности обмоток статора и ротора M . Будем исходить из возможности мягкого режима автоколебаний в системе, варьируя при этом значение взаимной индуктивности.

Исследования. Анализ результатов. Параметры АГ: мощность $P=275$ кВт, линейное напряжение $U_N=480$ В, частота сети $f=60$ Гц, параметры статора $R_S=0,016$ Ом, $X_{L_S}=0,06$ Ом, параметры ротора $R_r=0,015$ Ом, $X_{L_r}=0,06$ Ом. Взаимная индуктивность обмоток $L_m=3,5$ мГн, момент инерции $J=2$ кгм², коэффициент трения $f=0$, число пар полюсов $p=2$.

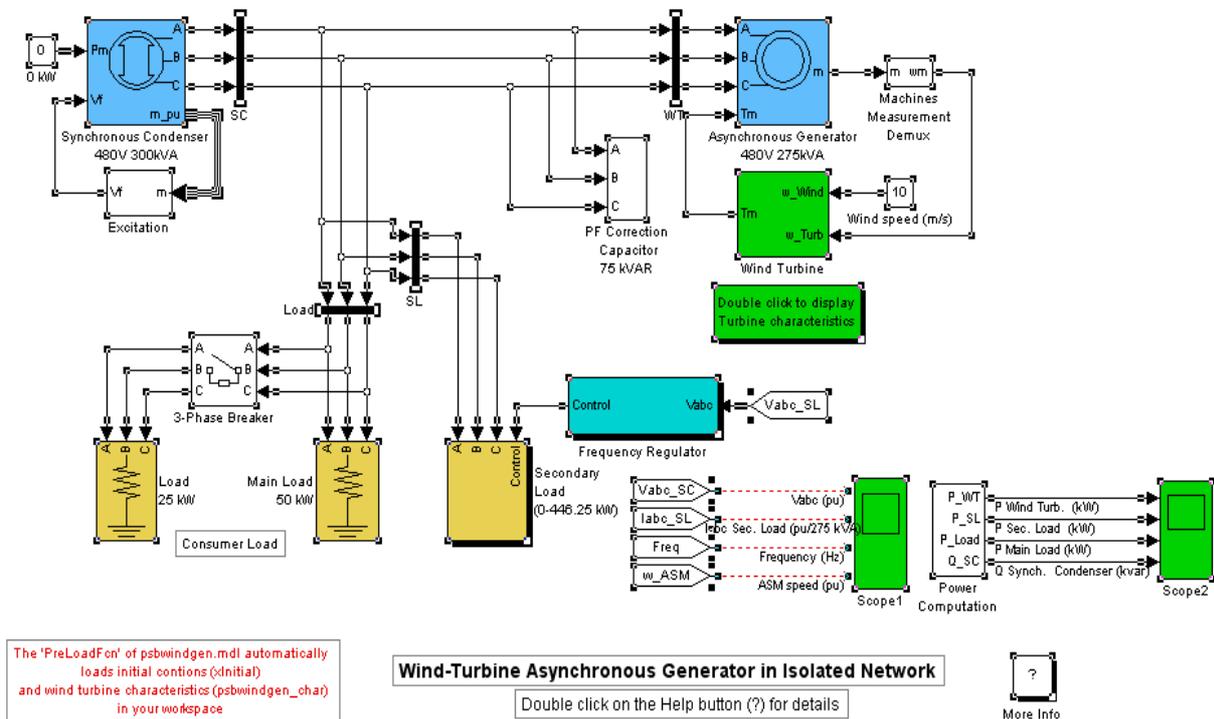


Рис. 5 – Модель автономного АГ в составе ветроэлектростанции для компьютерного моделирования

Параметры явнополюсного СГ (синхронный компенсатор): мощность $S=300$ кВА, линейное напряжение $U_N=480$ В, частота $f=60$ Гц, сопротивления $X_d=3,23$ Ом, $X'_d=0,21$ Ом, $X''_d=0,15$ Ом, $X_q=2,79$ Ом, $X'_q=0,37$ Ом, $X''_q=0,09$ Ом, $R_S=0,015$ Ом, $J=1$ кгм², коэффициент

трения $f=0$, число пар полюсов $p=2$.

Моделирование проведем в широко известном пакете прикладных математических программ Matlab с подпрограммой Simulink. Постоянные интегрирования в блоках выбраны в соответствии со стандартными требованиями теории математического моделирования, то есть на порядок меньше

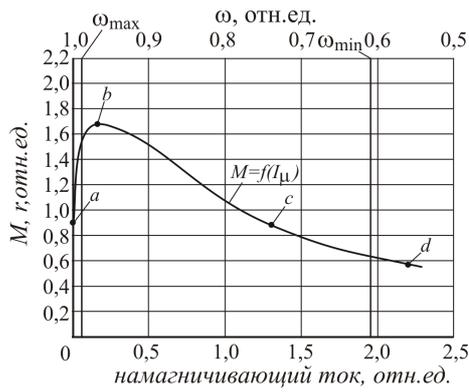
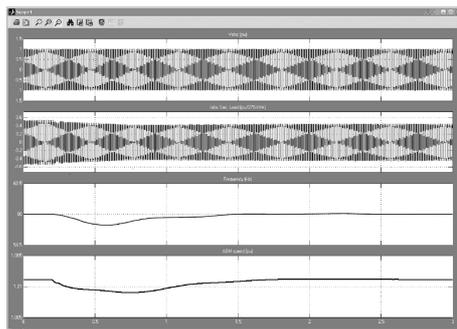


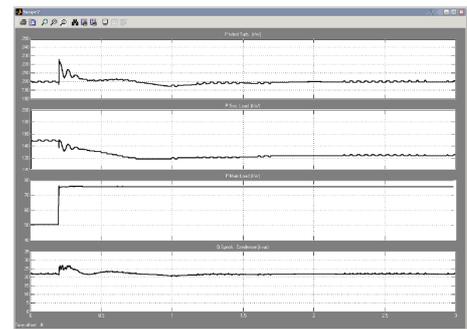
Рис. 6 – Зависимость $M(I_m)$

электромагнитной и электромеханической постоянных АГ, а также с учетом значений емкостей коррекции и возбуждения.

На рис.6 показана зависимость взаимной индукции от намагничивающего тока [7]. На рис. 7, а,б показаны переходные процессы в исследуемой системе при номинальных параметрах. На рис. 8, а, б самовозбуждение в АГ при уменьшении в 2 раза емкости возбуждения. На рис. 9, а,б процессы при уменьшении в два раза взаимной индуктивности и в два раза мощности возбуждения. В обоих случаях получены удовлетворительные переходные процессы и обеспечено самовозбуждение АГ.

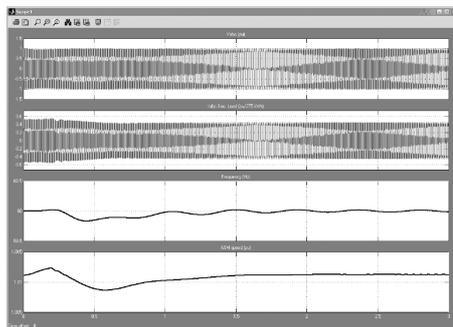


а

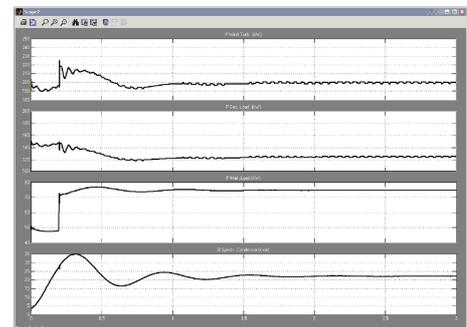


б

Рис. 7 – Переходные процессы в АГ: а –сверху вниз: напряжения, токи, частота сети и частота вращения ротора АГ; б – сверху вниз – мощность ветротурбины, мощность дополнительной нагрузки и основной, реактивная мощность СГ

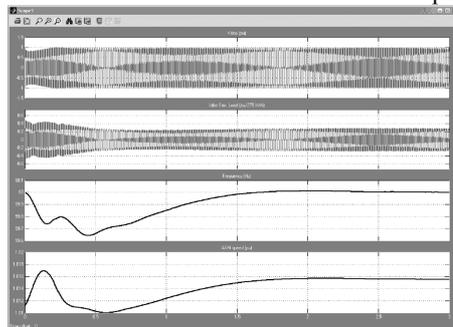


а

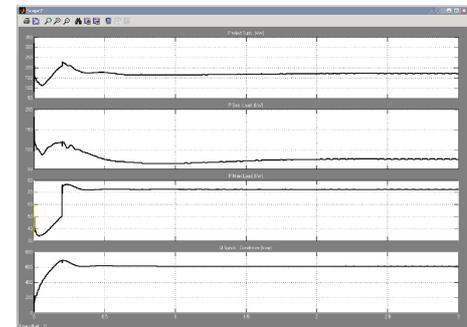


б

Рис. 8.– Уменьшение в 2 раза емкости возбуждения: а – сверху вниз: напряжения, токи, частота сети и частота вращения ротора АГ; б – сверху вниз: мощность ветротурбины, мощность дополнительной нагрузки и основной, реактивная мощность СГ



а



б

Рис. 9 – Уменьшение в два раза взаимной индуктивности и в два раза мощности возбуждения: а – сверху вниз: напряжения, токи, частота сети и частота вращения ротора АГ; б – сверху вниз: мощность ветротурбины, мощность дополнительной нагрузки и основной, реактивная мощность СГ

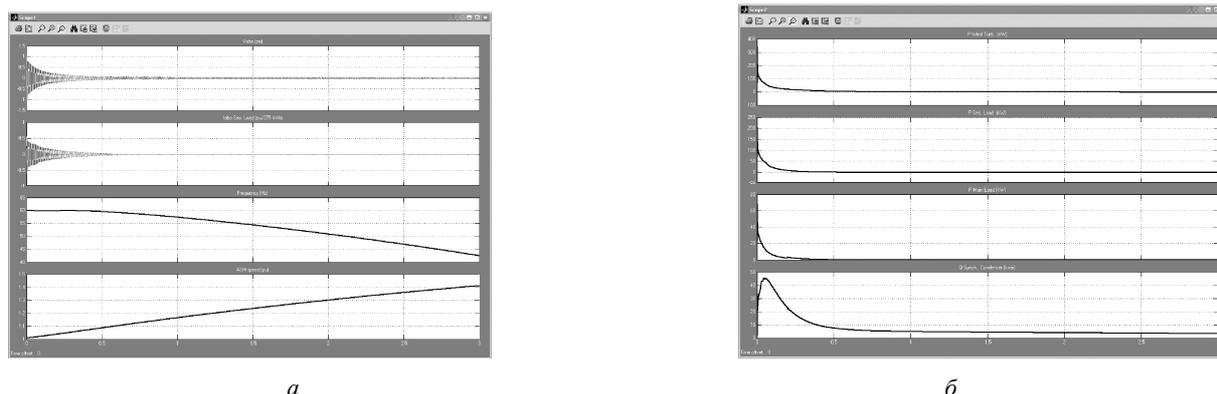


Рис. 10 – Мощность возбуждения уменьшена в десять раз и в два раза взаимная индуктивность: *a* – сверху вниз: напряжения, токи, частота сети и частота вращения ротора АГ; *b* – сверху вниз: мощность ветротурбины, мощность дополнительной нагрузки и основной, реактивная мощность СГ

На рис. 10, а,б показаны процессы, которые свидетельствуют об отсутствии самовозбуждения АГ. При этом мощность возбуждения уменьшена в десять раз и в два раза взаимная индуктивность.

Выводы. Показано, что при наличии компенсирующих конденсаторов, возможно уменьшать емкость конденсаторов возбуждения или мощность синхронного компенсатора. При этом если значение взаимной индуктивности обмоток статора и ротора АГ лежит вблизи точки *b* на кривой $M(I_m)$ (рис. 6), т.е. там, где находится максимальное значение M , то емкость конденсаторов возбуждения может быть снижена, тогда исследуемая система мягко входит в режим автоколебаний и требуются меньшие значения емкостей возбуждения, чем при нахождении значения M на интервале между точками *c* и *d*.

Список литературы: 1. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы / В. С. Кривцов, А. М. Алейников, А. И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац.аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст.нац.техн.ун-т, 2003. – 400 с. 2. Неисчерпаемая энергия. Кн.2. Ветроэнергетика / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац.аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст.нац.техн.ун-т, 2004. – 519 с. 3. Копылов И. П. Электрические машины: Учеб. для вузов/ И.П.Копылов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш.шк., 2002. – 607 с. 4. Китаев А. В., Орлов И. Н. О физическом механизме самовозбуждения асинхронной машины// Электричество, 1978, – № 4, с. 47 – 51. 5. Нетушил В. А. К расчету режима самовозбуждения автономного асинхронного генератора //

Электричество, 1978, – № 4, с. 52 – 55. 6. Джендубаев А.-З. Р. Определение границ области самовозбуждения асинхронного двигателя с фазным ротором // Электричество, 1998, – № 10, с. 44 – 48. 7. Джендубаев А.-З. Р. Особенности самовозбуждения автономных генераторов. Ч.2. Асинхронный генератор // Электричество, 2006, – № 12, с. 25 – 31. 8. R. Gagnon, B. Saulnier, G. Sybille, P. Giroux; "Modeling of a Generic High-Penetration No-Storage Wind-Diesel System Using Matlab/Power System Blockset" 2002 Global Windpower Conference, April 2002, Paris, France.

Bibliography (transliterated): 1. V. S., Krivstov, A. M. Aleinikov and A. I. Yakovlev. *Neischerpaemaya energia. Book 1. Vetroelectrogenerator. Uchebnik.* Kharkov: Nats.aerocosm. un-t «Khark.aviats. in-t», Sevastopol: Sevast.nats.tekh.un-t, 2003. Print. 2. V. S., Krivstov, A. M. Aleinikov and A. I. Yakovlev. *Neischerpaemaya energia. Book 2. Vetroelectrogenerator. Uchebnik.* Kharkov: Nats.aerocosm. un-t «Khark.aviats. in-t», Sevastopol: Sevast.nats.tekh.un-t, 2004. Print. 3. Kopylov, I. P. *Elektricheskie mashiny: Ucheb. Dlya vuzov.* 3rd ed., Moscow: Vysh.shk., 2002. Print. 4. Kitaev A. V., and I. N. Orlov. "O fizicheskom mekhanizme samovozbuzhdeniya avtonomnogo asinkhronnogo generator." *Elektrichestvo* 4. (1978): 47–51. Print. 5. Netushil, V. A. "K raschetu rezhima samovozbuzdeniya avtonomnogo asinkhronnogo generator." *Elektrichestvo* 4. (1978): 52–55. Print. 6. Dzhendubaev, A.-Z. R. "Opredelenie granits oblasti samovozbuzdeniya asinkhronnogo dvigatelya s faznym rotorom." *Elektrichestvo* 10. (1998): 44–48. Print. 7. Dzhendubaev, A.-Z. R. "Osobennosti samovozbuzdeniya avtonomnykh generatorov. Ch.2. Asinkhronniy generator" *Elektrichestvo* 12. (2006): 25–31. Print. 8. Gagnon, R., B. Saulnier, G. Sybille and P. Giroux. "Modeling of a Generic High-Penetration No-Storage Wind-Diesel System Using Matlab/Power System Blockset" 2002 Global Windpower Conference, April 2002, Paris, France. Print.

Поступила (received) 18.06.2015

«Сведения об авторах /About the Authors»

Марков Владислав Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры общей электротехники; e-mail: vlad2000191@rambler.ru

Markov Vladislav Sergeevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the chair of general electrical engineering; e-mail: vlad2000191@rambler.ru

Поляков Игорь Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры общей электротехники; e-mail: pivkpi@kpi.kharkov.ua

Polyakov Igor Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the chair of general electrical engineering; e-mail: pivkpi@kpi.kharkov.ua