

В.С. МАРКОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

И.В. ПОЛЯКОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

С.М. КОЖЕМЯКИН, ст. преподаватель, НТУ "ХПИ"

ПРОБЛЕМАТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В статье рассмотрены проблемы использования асинхронных генераторов на ветроэлектростанциях. В частности – возбуждение этих генераторов, выбор емкостей возбуждения и корректирующих емкостей, стабилизация напряжения генератора под нагрузкой, переходные процессы в асинхронном генераторе на ветроэлектростанции. Рассматриваются модели асинхронного генератора на ветроэлектростанции для компьютерного моделирования.

Ключевые слова: асинхронный генератор, ветроэлектростанция, проблемы асинхронных генераторов, компьютерное моделирование асинхронного генератора на ветроэлектростанции.

Актуальность. В настоящее время, в условиях постоянно сокращающихся невозобновляемых источников энергии, во всем мире усиливается тенденция к использованию возобновляемых источников энергии, прежде всего это касается энергии ветра. Так, например, в странах ЕС в 2010 году с помощью ветроэлектростанций (ВЭС) получено около 170 гигавагт электроэнергии. Актуальность этого направления развития энергетики подчеркивается тем, что за последние 15 лет количество электроэнергии, выработанной ВЭС, возросло почти в тридцать раз. Особенно преуспели в ветроэнергетике Дания и Германия.

В ВЭС могут использоваться как генераторы постоянного тока, так и переменного, причем как синхронные, так и асинхронные. Выработка энергии постоянного тока осуществляется практически только на малых мощностях не более 10 кВт, так как генераторы постоянного тока относительно дороги и не очень надежны в эксплуатации. Энергия переменного тока в основном вырабатывается синхронным генератором (СГ), однако использование асинхронного генератора (АГ), на наш взгляд, является достаточно перспективным.

Анализ исследований и публикаций. Во-первых, как указано в [1, 2] АГ отличаются простотой эксплуатации и обслуживания, легко включаются на параллельную работу, во-вторых, форма кривой

© В.С. Марков, И.В. Поляков, С.М. Кожемякин

выходного напряжения у них ближе к синусоидальной, чем у синхронных генераторов при работе на одну и ту же нагрузку. В-третьих, масса АГ мощностью 5-100 кВт примерно в 1,3-1,5 раза меньше массы СГ такой же мощности. Причем, в качестве АГ, можно применять обычные асинхронные двигатели. В отличие от СГ асинхронные генераторы не подвержены опасности выпадения из синхронизма. Кроме того, в [1] указывается, что главное преимущество АГ состоит в том, что напряжение на его выходе имеет постоянную частоту при изменении частоты вращения ротора в некоторых пределах и ему свойственна большая устойчивость при работе на сеть, чем у СГ. Последнее обстоятельство крайне важно в связи с тем, что ВЭС становятся все более мощными.

Однако АГ не получили широкого распространения, что объясняется рядом их недостатков по сравнению с СГ. Ввиду того, что в генераторном режиме асинхронной машины условия создания вращающегося поля статора такие же, что и в двигательном режиме (и в том, и в другом режимах обмотка статора включена в сеть с напряжением U_1 , и потребляет из сети намагничивающий ток I_0), то асинхронная машина в генераторном режиме обладает особыми свойствами: она потребляет реактивную энергию из сети, необходимую для создания вращающегося поля статора, но отдает в сеть активную энергию, получаемую в результате преобразования механической энергии первичного двигателя. Одним из существенных недостатков АГ является значительная реактивная мощность, потребляемая ими из сети. Величина этой мощности пропорциональна намагничивающему току I_0 и может достигать 25-45 % от номинальной мощности машины. Из этого следует, что для работы 3-4 асинхронных генераторов необходимо использовать один синхронный генератор такой же мощности, что и мощность одного асинхронного генератора.

Если же АГ работают параллельно на общую сеть с несколькими СГ, то большая величина реактивной мощности возбуждения АГ значительно понизит коэффициент мощности всей электрической сети.

АГ может работать и в автономных условиях, т.е. без включения в общую сеть. Но в этом случае для получения реактивной мощности, необходимой для намагничивания генератора, используется батарея конденсаторов, которая подключается к выводам АГ параллельно нагрузке, как показано на рис. 1.

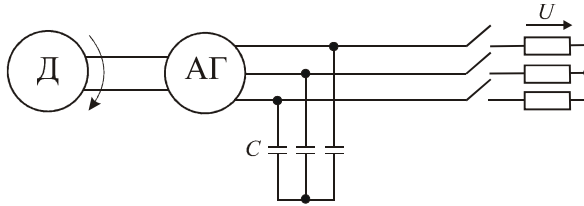


Рис. 1 – Включение конденсаторной батареи в фазы обмотки статора

Как указывается в [1, 3] непременным условием такой работы АГ является наличие остаточного намагничивания стали ротора, что необходимо для процесса самовозбуждения генератора. Небольшая ЭДС $E_{ост}$, наведенная в обмотке статора, создает в цепи конденсаторов, а следовательно, и в обмотке статора небольшой реактивный ток, усиливающий остаточный поток $\Phi_{ост}$ в ферромагнитной части магнитной цепи, который при вращении ротора АГ наводит в обмотке статора ЭДС остаточного поля. Эта ЭДС при шихтованном роторе составляет $E_{ост} = 2 \div 3$ % от номинального значения. В дальнейшем процесс самовозбуждения развивается, как и в генераторе постоянного тока параллельного возбуждения. Изменением емкости конденсаторов можно изменять величину намагничивающего тока, а следовательно, и величину напряжения генераторов. Из-за чрезмерной громоздкости и высокой стоимости конденсаторных батарей АГ с самовозбуждением не получили достаточного распространения. Асинхронные генераторы применяются лишь на ВЭС вспомогательного значения малой мощности.

Кроме того, в [4] указывается, что с присоединением к зажимам возбужденного АГ нагрузки потребляемая им реактивная мощность изменяется. Это фактор, а также необходимость компенсации реактивной мощности нагрузки заставляют увеличивать возбуждающую емкость до значения

$$C = \frac{P_1 (\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2) \cdot 10^9}{6 \pi f U_1^2}, \quad (1)$$

где P_1 – реактивная мощность, отдаваемая генератором, U_1 – линейное напряжение, f – частота напряжения, φ_1 , φ_2 – углы сдвига между напряжением и токами соответственно генератора и нагрузки.

Можно использовать корректирующие конденсаторы, которые соединяются между собой треугольником или звездой и включаются в каждую фазу нагрузки. Их емкость можно оценивать с учетом приведенной формулы и исходной емкости возбуждения, которая

рассчитывается из равенства реактивных мощностей конденсаторной батареи и АГ. Корректирующий конденсатор позволяет улучшить качество выходного напряжения, снизить броски токов статора и ротора, увеличить плавность в переходных процессах частоты напряжения и частоты вращения ротора, снизить колебания активной и реактивной мощности при включении нагрузки.

Согласно [1] альтернативой конденсаторному возбуждению является вентильное возбуждение АГ большой мощности. При этом использование автономного инвертора позволяет ограничиться для возбуждения АГ конденсаторами меньшей мощности, примерно в пять раз. Схема генерирования тока АГ с вентильным возбуждением показана на рис.2. Где АИН – автономный инвертор напряжения, АБ – аккумуляторная батарея, Ф – фильтр.

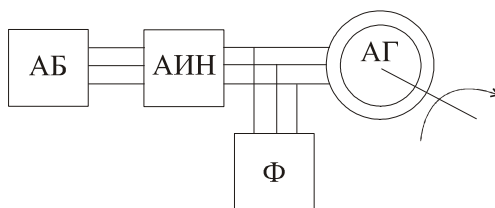


Рис. 2 – Схема генерирования тока АГ с вентильным возбуждением

Для расчета установившихся и переходных режимов АГ на ВЭС используются разные математические модели. В [5] указывается, что при расчете установившихся режимов асинхронной машины обычно используют известную Т-образную схему замещения, которой соответствует следующая система уравнений

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{1\phi} &= -\underline{E}_\mu + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1; \\ 0 &= \underline{E}_\mu - \underline{I}'_2 \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right); \\ \underline{I}_\mu &= \underline{I}_1 + \underline{I}'_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При работе асинхронной машины в качестве АГ, она включается не на сеть, а на нагрузку, которая в общем случае является активно-индуктивной $\underline{Z}_н = R_н + jX_н$. Схема замещения АГ с конденсаторным возбуждением [6] представлена на рис. 3.

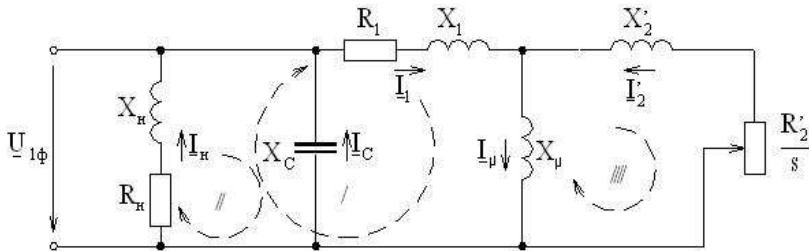


Рис. 3 – Схема замещения автономного асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением

Обозначения на схеме: $\underline{U}_{1\phi}$ – фазное напряжение статора; \underline{I}_1 – ток статора; \underline{I}'_2 – ток ротора, приведенный к обмотке статора; R_1 и X_1 – активное и реактивное сопротивления статора, R'_2 и X'_2 – приведенные активное и реактивное сопротивления ротора; \underline{I}_μ – ток холостого хода или намагничивающий ток; s – скольжение; $\underline{E}_\mu = -jX_\mu \underline{I}_\mu$ – ЭДС холостого хода; X_μ – индуктивное сопротивление взаимоиндукции.

Уравнения, описывающие эту схему, можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_H (R_H + jX_H) &= \underline{E}_\mu - \underline{I}_1 (R_1 + jX_1); \\ 0 &= \underline{E}_\mu - \underline{I}'_2 \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right); \\ \underline{I}_\mu &= \underline{I}_1 + \underline{I}'_2; \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_H + \underline{I}_C; \\ (R_H + jX_H) \underline{I}_H &= jX_C \underline{I}_C. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где X_C – сопротивление батареи конденсаторов; \underline{I}_C – ток, протекающий через батарею конденсаторов; \underline{I}_H – ток нагрузки.

В отличие от АГ, работающего на мощную сеть, для автономного АГ остаются неизвестными частота тока статора f_1 (т.е. скольжение s и реактивные сопротивления АГ) и фазное напряжение $\underline{U}_{1\phi}$ (т.е. ток нагрузки \underline{I}_H). К тому же, возникают трудности с определением значения индуктивного сопротивления цепи намагничивания X_μ и, как

следствие, зависимости ЭДС холостого хода от тока холостого хода

$$E_{\mu} = f(I_{\mu}).$$

Поэтому для компьютерного моделирования АГ в составе ВЭС удобно использовать компьютерную модель, представленную в [7]. Остановимся на ней подробнее.

Ветроустановка с асинхронным генератором в составе ветродизельной системы в изолированной электрической сети работает на острове Сейнт Пол, штат Аляска, США с 1999 года. Данная система использует синхронную машину напряжением 480 В, полной мощностью 300 кВА, асинхронный генератор 480 В, 275 кВА, потребительская нагрузка 50 кВт и переменная вторичная нагрузка, изменяющаяся от 0 до 446,25 кВт.

При малых скоростях ветра асинхронный генератор и дизель-синхронный генератор вместе питают нагрузку. Когда энергия ветра превосходит мощность нагрузки, становится возможным выключить дизель-генератор. Вторичная нагрузка используется для регулирования частоты системы, поглощая избыточную энергию ветра.

В компьютерной модели этой системы блок вторичной нагрузки состоит из восьми наборов трехфазных резисторов соединенных последовательно с ГТО тиристорными ключами. Номинальная мощность каждого набора подчиняется бинарной прогрессии таким образом, что нагрузка может изменяться от 0 до 446, 25 кВт с шагом 1,75 кВт. ГТО тиристоры моделируются идеальными ключами. Регулятор частоты использует стандартную систему частотно-фазовой автоматической подстройки для измерения частоты сети. Измеряемая частота сравнивается с заданной частотой 60 Гц и при этом определяется ошибка по частоте. Эта ошибка интегрируется для вычисления фазовой ошибки. Фазовая ошибка потом используется ПИД-регулятором для получения сигнала выхода, представляющего требуемую мощность вторичной нагрузки. Аналоговый сигнал преобразуется в восьмибитный цифровой сигнал, контролирующий переключение трехфазных резисторов вторичной обмотки трансформатора. Для того, чтобы уменьшить колебания напряжения, переключения производятся при пересечении синусоиды напряжения с горизонтальной осью. Скорость ветра для данной компьютерной модели выбирается 10 м/с, что позволяет ветроустановке производить достаточно мощности, чтобы питать нагрузку. Дизель-генератор (не моделируется) и синхронная машина работает как синхронный компенсатор. В принципе можно рассматривать указанную

компьютерную модель и как работу АГ параллельно с сетью. Демо-файл иллюстрирует динамические процессы в системе регулирования частоты, когда включена дополнительная потребительская нагрузка 25 кВт. В соответствии с характеристиками турбины, для скорости ветра 10 м/с, выходная мощность турбины 206 кВт. Благодаря удобству структурного моделирования, достигается хорошая визуализация переходных процессов по всем параметрам системы.

При работе АГ параллельно с сетью при сравнении с СГ в [1] указывается, что АГ требуют менее жестких условий включения, даже может быть включен при значительной разнице в частотах самого АГ и сети. АГ исключают проблему синхронизации с сетью и выпадения из синхронизма, а также не требует защиты от коротких замыканий, так как в этом случае он теряет возбуждение. Более того, в [1] утверждается, что при параллельной работе с сетью для АГ отпадает необходимость в системе самовозбуждения и регулирования напряжения и АГ обеспечивает лучшие качества выходного напряжения по сравнению с СГ.

Однако в [8] сделан вывод, что АГ имеет более высокие пусковые токи при включении генератора на работу параллельно с сетью. Подчеркивается необходимость демпфирования ударных токов и моментов АГ. При подключении их к сети имели место поломки лопастей, отмечалось разрушение подшипников генераторов. Переходные процессы в ВЭС сопровождаются как ударными динамическими моментами, так и ударными токами. Величина ударных токов может в 11 раз и более превышать номинальный ток асинхронного двигателя. Также указывается, что в эксплуатации имели место случаи, когда при переходных процессах происходили поломки лопастей турбины, поломки деталей крепления агрегатов модуля, несанкционированные срабатывания защитной аппаратуры.

Для исследования токов в цепи статора при постоянной частоте вращения ротора АГ возможно использование модели, представленной на рис. 4.

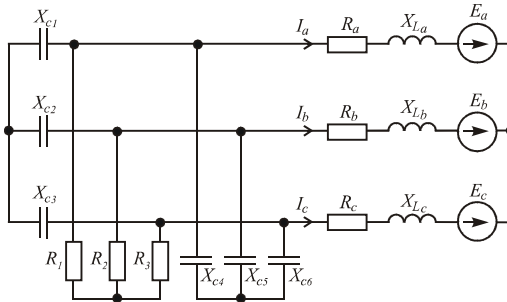


Рис. 4 – Упрощенная модель исследуемой системы

Постановка задачи.

Исходя из вышесказанного, следует постановка цели и задач исследования. Цель статьи – определение основных проблем АГ в составе ВЭС и путей их решения.

В связи с этим, необходимо решить следующие задачи:

1) выбрать наиболее достоверную и удобную с точки зрения компьютерного моделирования модель АГ в составе ВЭС;

2) провести компьютерное моделирование переходных процессов и установившихся режимов напряжений на зажимах статора, статорных токов, активной мощности ветротурбины, активной мощности, которую потребляет основная и дополнительная нагрузки, а также переходной процесс реактивной мощности;

3) исследовать влияние параметров АГ, системы возбуждения и параметров нагрузки на характер переходных процессов по основным координатам системы;

4) определить способы регулирования координат АГ в составе ВЭС.

Исследования. Анализ результатов.

В качестве наилучшей компьютерно-интегрированной модели примем модель, указанную в [7] и уже подробно описанную ранее в данной статье.

На рис. 5 показана структурная схема, по которой проводилось моделирование.

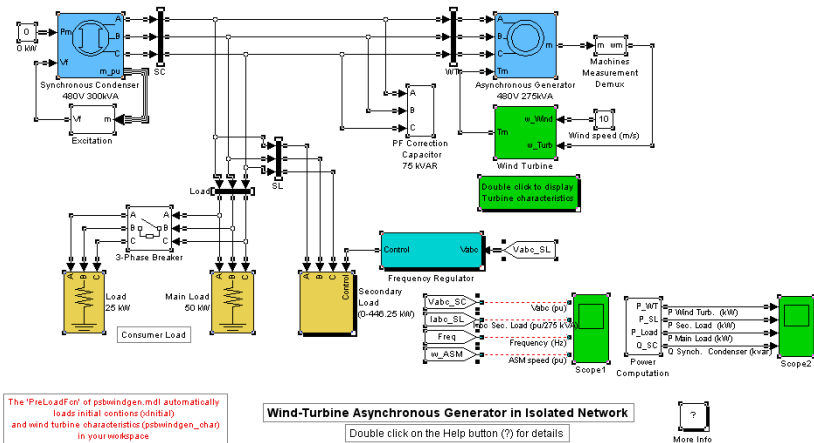


Рис. 5 – Моделируемая структурная схема АГ в составе ВЭС

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, т.е. на порядок меньше электромагнитной и электромеханической постоянных АГ, а также с учетом значений емкостей коррекции и возбуждения. На рис. 6 представлено семейство характеристик ветротурбины в координатах – частота вращения АГ и мощность турбины.

Параметры АГ: мощность $P = 275$ кВт, линейное напряжение $U_N = 480$ В, частота сети $f = 60$ Гц, параметры статора $R_s = 0,016$ Ом, $L_s = 0,06$ Ом, параметры ротора $R_r = 0,015$ Ом, $L_r = 0,06$ Ом. Взаимная индуктивность обмоток $L_m = 3,5$ мГн, момент инерции $J = 2$ кгм², коэффициент трения $f = 0$, число пар полюсов $p = 2$. Параметры явнополюсного СГ (синхронный компенсатор): мощность $P = 300$ кВт, 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, $X''_q = 0,09$, $R_s = 0,015$ Ом, $J = 1$ кгм², коэффициент трения $f = 0$, число пар полюсов $p = 2$.

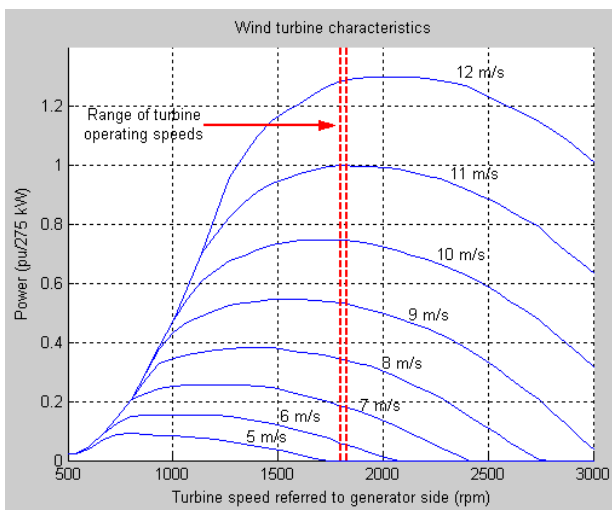


Рис. 6 – Семейство характеристик ветротурбины (пунктиром указан рабочий диапазон частот вращения турбины)

Способы регулирования координат исследуемой системы (статорные токи и напряжения и их частота) – с помощью изменения корректирующей емкости или с помощью ПИД-регулятора, а также комбинация этих двух способов.

На рис. 7 показаны графики переходных процессов (сверху вниз): напряжений, статорных токов, частоты сети и частоты вращения вала АГ. На рис. 8 (сверху вниз) показаны переходные процессы: мощность турбины, мощность вторичной нагрузки, мощность основной нагрузки, реактивная мощность СГ. Напряжения и токи статора практически стабильны, а вот в графиках частот напряжения и вращения ротора АГ, есть небольшая просадка в течение 1 сек. Переходные процессы в исследуемой системе вполне удовлетворительны с точки зрения устойчивости, быстродействия, уровня колебаний. Были исследованы различные сочетания корректирующих емкостей, параметров регулятора частоты, активных и реактивных сопротивлений обмотки статора и ротора АГ на характере переходных процессов.

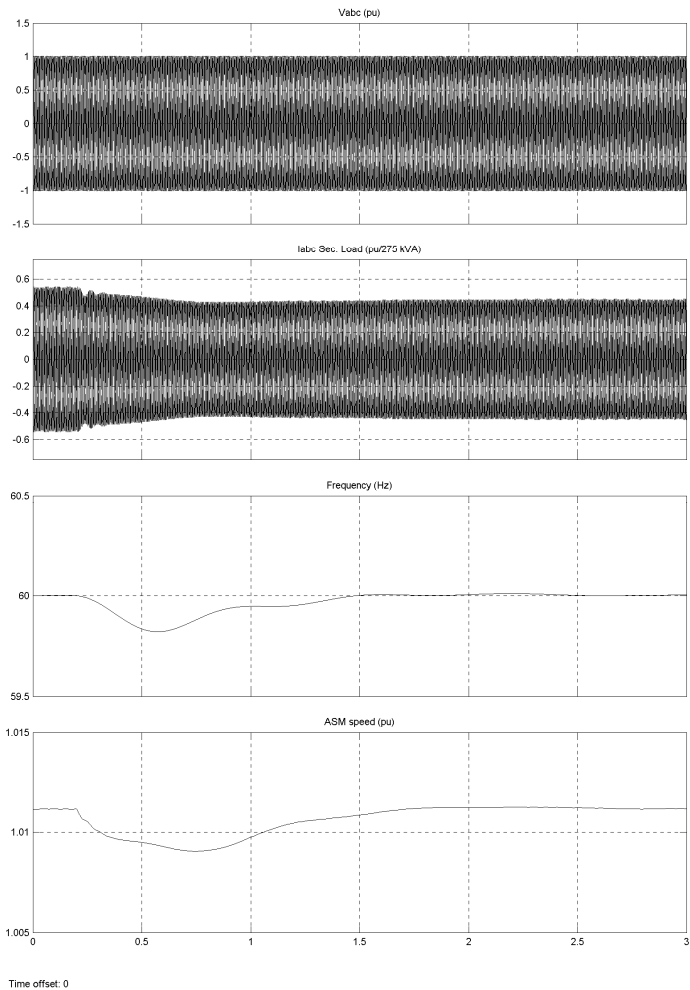
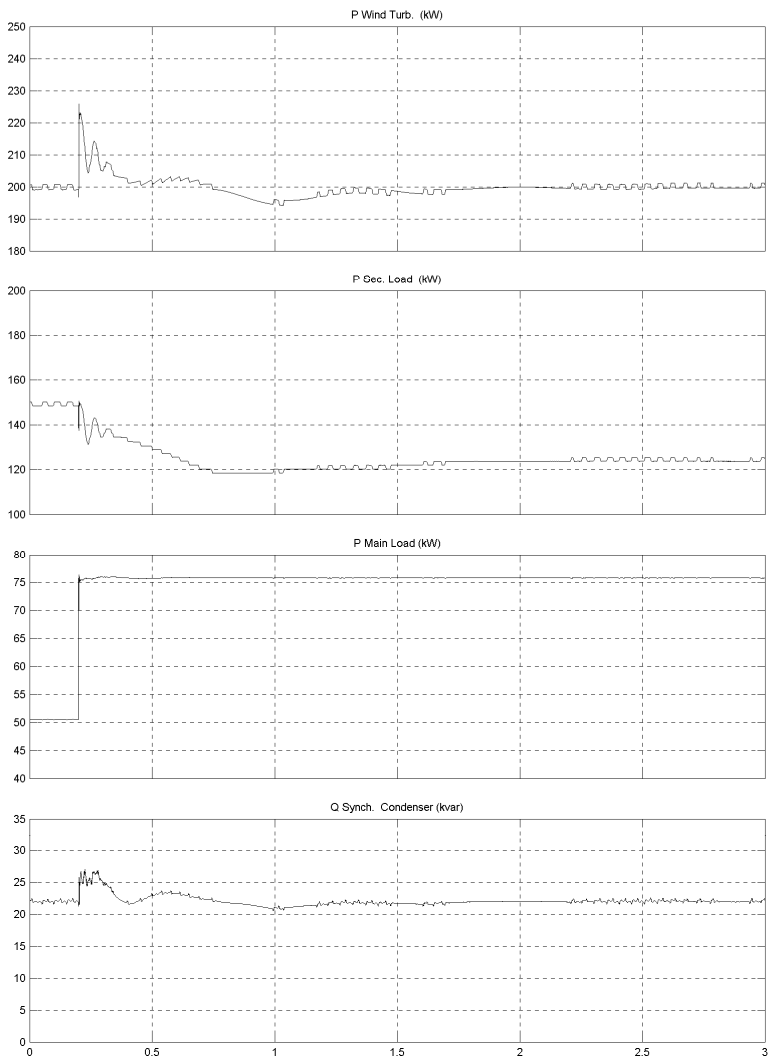


Рис.7 – Переходные процессы в ВЭУ с АГ (напряжения, токи, частота сети и частота вращения ротора АГ)



Time offset: 0

Рис. 8 – Переходные процессы в ВЭУ с АГ (мощность ветротурбины, мощность дополнительной нагрузки и основной, реактивная мощность СГ)

Выводы. Рост нагрузки в системе должен сопровождаться ростом корректирующих емкостей, однако зависимость между значением емкости и ростом нагрузки нелинейна и напоминает кривую насыщения. Оптимальная емкость в рассматриваемой системе приблизительно соответствует формуле (1).

Изменения параметров ПИД-регулятора частоты, как показали исследования, могут значительно смягчать механические характеристики, что обеспечивает более плавные переходные процессы, снижает динамические нагрузки, уменьшает потери и увеличивает надежность, срок эксплуатации и КПД, но при этом замедляет быстроедействие системы ВЭС с АГ.

Изменения параметров обмоток статора и ротора АГ, как правило, приводят к небольшому увеличению колебательности, но снижаются частоты колебаний, т.е. снижаются вибрации, что особенно важно для механической части ВЭС.

Список литературы: 1. Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэлектрогенераторы / В.С.Кривцов, А.М. Алейников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац.аэрокосм. ун-т «Харьк.авиаци. ин-т», Севастополь: Севаст.нац.техн.ун-т, 2003. - 400 с. 2. Неисчерпаемая энергия. Кн.2. Ветроэнергетика / В.С.Кривцов, А.М. Алейников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац.аэрокосм. ун-т «Харьк.авиаци. ин-т», Севастополь: Севаст.нац.техн.ун-т, 2004. -519 с. 3. Кацман М. М. Электрические машины и трансформаторы. – М.: 1971, с. 4. П.Д. Лежнюк, Р.В.Никиторович, Жан-Пьер Нгома Компенсация реактивной мощности асинхронных генераторов на малых гидроэлектростанциях // Энергетика и электротехника. Наукові праці. – ВНТУ, 2008. – №2, с.1–7. 5. Вольдек А.И. Электрические машины. 2-е изд. – Л.: Энергия, 1974. С.507-509, С.590-592. 6. Вокін І. А. Совершенствование источника питания автономной системы электроснабжения на основе асинхронного вентильного генератора. Автореферат на соискание степени канд.техн.наук., – Саратов, 2008. 7. 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. 8. Дорохов А.Г. Снижение динамических перегрузок с целью повышения надежности асинхронных генераторов ветроэлектродоагрегатов, работающих параллельно с сетью. Диссертация на соискание ученой степени канд., техн. наук, –Харьков, 2005.

Bibliography (transliterated): 1. *Neischerpaemaya energiya. Book 1. Vetroelectrogeneratory* V.S.Krivstov, A.M. Aleinikov, A.I. Yakovlev. – Uchebnik. – Kharkov: Nats.aerocosc. un-t «Khark.aviats. in-t», Sevastopol: Sevast.nats.tekh.un-t, 2003. – 400 c. 2. *Neischerpaemaya energiya. Book 2. Vetroelectrogeneratory* V.S.Krivstov, A.M. Aleinikov, A.I. Yakovlev. – Uchebnik. – Kharkov: Nats.aerocosc. un-t «Khark.aviats. in-t», Sevastopol: Sevast.nats.tekh.un-t, 2004. – 519 c. 3. Katsman M. M. *Elektricheskie mashiny i transformatory*. – M.: 1971. 4. P.D. Lezhnyuk, R.V.Nikitorovich, Jan-Pierre Ngoma *Kompensatsia reaktivnoy moshnosti asinkhronnykh generatorov na malyykh gidroelektrostantsiyakh*. Energetika i electrotekhnika. Naukovi pratsi. – VNTU, 2008. – № 2, p. 1-7. 5. Voldek A.I. *Elektricheskie mashiny*. 2-e izd. – L.: Energiya, 1974. PP. 507-509, 590-592. 6. Vokin I. A. *Sovershenstvovanie istochnika pitaniya avtonomnoy sistemy electrosnabzhenia na osnove asinchnornogo ventilnogo generatorya*. Avtoreferat na soiskanie stepeni kand.tekhn.nauk., – Saratov, 2008. 7. 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. **8.** Dorokhov A.G. *Snijenie dinamichestkikh peregruzok s tseliyyu povysheniya nadezhnosti asinkhronnykh generatorov vetroelectroagregatov, rabotauyichkh parallelno s setiyyu.* Dissertatsiy na soiskanie stepeni kand.tekhn.nauk., – Kharkov, 2005.

Поступила (received) 09.04.2015



Марков Владислав Сергеевич, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера электромеханика в 1994 году в Харьковском государственном политехническом университете по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок», диссертацию кандидата технических наук в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» по специальности «Электротехнические комплексы и системы» в 2001 г. Доцент кафедры общей электротехники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» с 2003 года. Научные интересы связаны с расчетом динамических процессов в электротехнических устройствах.



Поляков Игорь Владимирович, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера электромеханика в 1988 году в Харьковском политехническом институте по специальности «Электрические машины и аппараты», диссертацию кандидата технических наук в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» по специальности «Электрические машины и аппараты» в 1999 г. Доцент кафедры общей электротехники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» с 2001 года. Научные интересы связаны с моделированием и расчетом электрических и магнитных цепей в электрических машинах и аппаратах.



Кожмякин Сергей Михайлович – старший преподаватель. Защитил диплом инженера-криофизика в 1982 году в Харьковском политехническом институте по специальности «Электрические машины и аппараты». Старший преподаватель кафедры общей электротехники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» с 1992 года. Научные интересы связаны с проектированием и исследованием электрических машин.