

УПРАВЛЕНИЕ НА АСИНХРОНЕН ГЕНЕРАТОР С НАВИТ РОТОР ЗА ВЕТРОЕНЕРГИЕН АГРЕГАТ

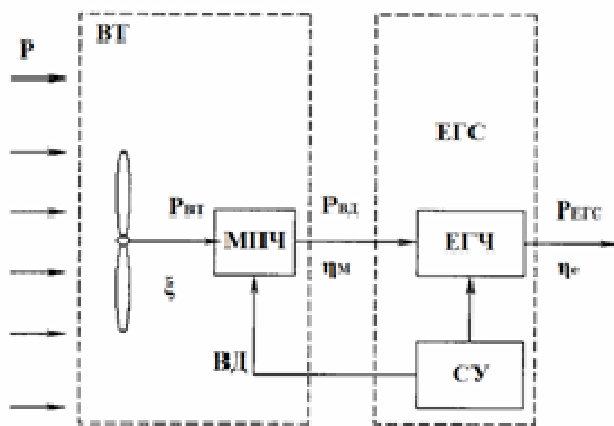
Пламен Манасиев , Цветомир Тодоров

Abstract: In this paper are considered the possibilities of using a wound rotor induction generator (WRIG) by external resistance control for variable-speed wind power plant, connected to the grid. The characteristics in steady-state mode are presented and methodology for their coordination at maximum power generation is proposed. A model of WRIG is proposed and dynamic characteristics of the generator for variable wind speed are presented.

Keywords: wind power plant , effective control, external resistance impulse control, efficiency.

ВЪВЕДЕНИЕ

Използването на ветровата енергия, като част от ВЕИ, е с висок приоритет в последните години. Същността на т.нар. „директно” преобразуване на ветровата енергия в електрическа е, с използване на различни електрогенериращи системи (ЕГС), да се създадат техническите условия за получаването на променливотокова енергия с постоянни параметри (U_m и f) - в условията на променлива скорост на въртене на ветротурбината (ВТ) (съответно ветродвигателя –ВД) на ветроенергийния агрегат (ВЕА) [1]. На фиг.1 е показана блоковата схема на последния, където в електрогенериращата част (ЕГЧ) се използват различни генератори.



Фиг. 1.

Проектирането на ЕГС с избор на подходящи електрически машини и вентилни преобразуватели, стратегия, принцип, методи и средства за управление са основните тенденции днес. В областта на мегаватния мощностен клас на ВЕА се утвърди използването на генераторите с двойно захранване [2],[4],[7], синхронни генератори с перманентно възбуждане, безредукторни ВЕА [5], както и прилагането на съвременните методи на управление (адаптивно, робастно) [3], [6], [8]. Едновременно с това нараства и интереса към разработването на ВЕА с неголяма мощност (десетки киловата)- с опростена техническа реализация, добри икономически показатели и достатъчно висока ефективност - в условията на нарастващия комерсиален (в добрия смисъл) интерес към въвеждането в експлоатация на ветроенергийни съоръжения.

ПОСТАНОВКА И ИЗСЛЕДВАНИЯ

Основните изисквания към ЕГС на ВЕА , работещи в паралел с мрежа и в условията на променлива скорост, са свързани с енергетични и икономически критерии:

- Осигуряване на постоянство на параметрите на генерираното напрежение от ЕГС при променящата се скорост на ветровия поток;
- Реализиране на управление, осигуряващо максимална ефективност на ВЕА, съобразно наличните ветрови ресурси и изискванията на мрежата;

-Простота на техническата реализация и ниска себестойност.

Съотношенията, описващи процеса на ветроенергопреобразуване, са дадени с (1)-(7), където: P , P_{VT} , $P_{ВД}$ са съответно мощностите на ветровия поток, ВТ и ВД; M^* , M_{VT} , $M_{ВД}$ – относителен момент, моменти на ВТ и ВД; ξ , Z – съответно коефициент на използване по мощност и бързоходност на ВТ; v , R , ρ , η_m – скорост на вятъра, радиус на ВТ, плътност на въздуха и к.п.д. на МПЧ.

$$P = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 / 2 \quad (1)$$

$$P_{VT} = \xi(Z) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 / 2 \quad (2)$$

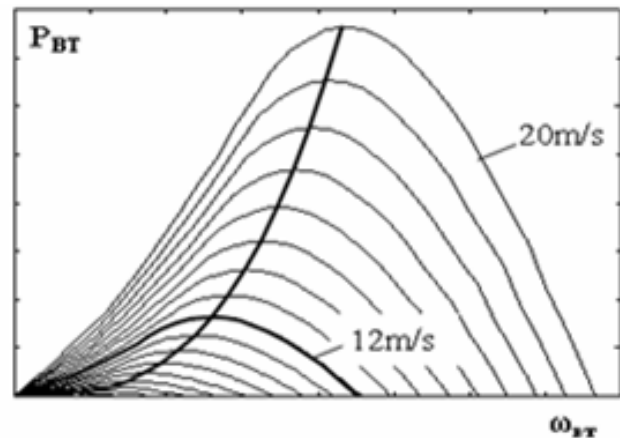
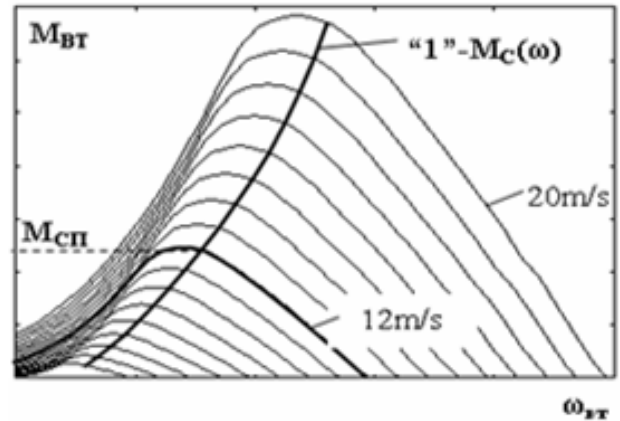
$$\xi = \frac{P_{VT}}{P} \quad (3)$$

$$Z = \frac{u}{v} = \frac{\omega_{VT} R}{v} \quad (4)$$

$$M_{VT} = \frac{P_{VT}}{\omega_{VT}} = M^*(Z) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^2 / 2 \quad (5)$$

$$P_{ВД} = \eta_m \cdot P_{VT} = \eta_m \cdot \xi(Z) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 / 2 \quad (6)$$

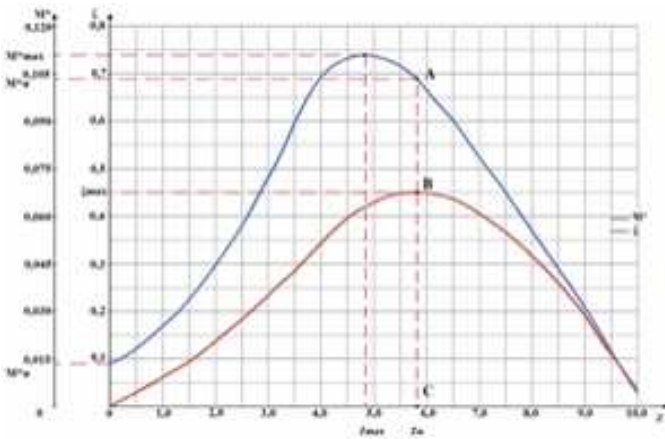
$$M_{ВД} = \frac{M_{VT}}{i} \eta_m = \eta_m \cdot \xi(Z) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 / (2 \cdot i) \quad (7)$$



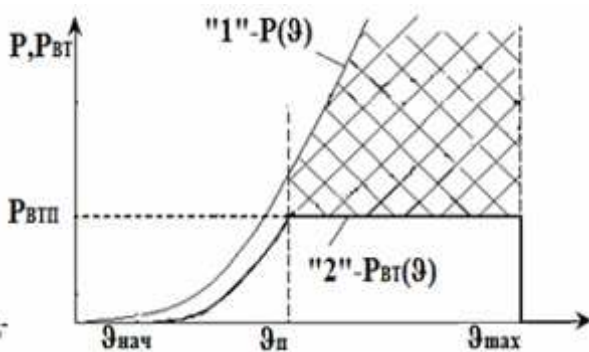
Фиг. 4

Зависимостите на относителния момент (M^*) и коефициента на използване (ξ) от Z (фиг.2) са основни характеристики на ветротурбината. На фиг.3 са показани мощността на ветропотока $P(J)$, съгласно (1), и мощността (теоритична) $P_{VT}(J)$ на реалния ВЕА (заприхованата зона съответствува на неизползуваната ветрова мощност). Характеристиките $M_{VT}(\omega_{VT})$ и $P_{VT}(\omega_{VT})$ при $J = \text{const}$. На фиг.4 (механични и мощностни - съгласно (5) и (2)) определят регулировъчните и енергетични възможности на ВТ - респективно на ВЕА.

Проектната мощност ($P_{ВТП}$) е определена при J_p , когато ВЕА (ВТ) работи с коефициент на използване ξ_{max} . Включването (пускане) и изключването (спиране) на ветроагрегата е съответно при $J_{\text{нач}}$ и J_{max} . В повечето въведени в експлоатация ВЕА, с асинхронни и синхронни генератори (нерегулируеми), работата в диапазоните $J_{\text{нач}} \div J_p$ и $J_p \div J_{\text{max}}$ е при $\xi < \xi_{\text{max}}$. В случая понятието „ефективно управление” включва



Фиг. 2



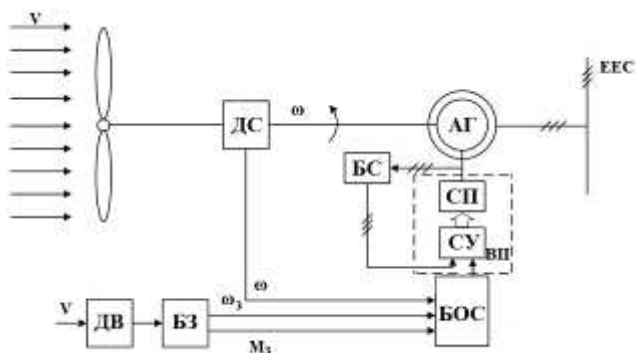
Фиг. 3

работа на ВЕА в диапазона $J_{нач} \div J_{п}$ с $\xi = \xi_{max} (M_c(\omega))$ - при подходящо регулиране на ЕГС (генератора). Това е предмет на разработки в последните години за мегаватния клас ВЕА, както и представлява интерес, относно технико-икономическите предимства при реализацията му, при ВЕА с по-малка мощност (до 100 kW) - с използването на асинхронен генератор с навит ротор (АГНР) - с цел извличане на максимална мощност в диапазона $J_{нач} \div J_{п}$.

Основното уравнения на динамиката в ЕГС се представя с (8), където: $M_{дин}$ - динамичен момент, $M_{ВД}$ - момент, развиван от ветротурбината, $M_{Г}$ - момент развиван от АГ, $J_{Г}$ - инерционен момент; ω - ъглова скорост на генератора и ветродвигателя ($\omega_{Г} = \omega_{ВД}$).

$$M_{дин} = J_{Г} \cdot d\omega/dt = M_{ВД} - M_{Г} \quad (8)$$

Разглежда се схемно решение на ВЕА с АГНР и регулиране на момента - функционална схема показана на фиг.5. Използва се вентилен преобразувател в роторната верига (ВП), включващ система за управление (СУ) и силов преобразувател (СП) – изграден от трифазен изправител и тиристорен комутатор. Моментът $M_{ВД}$ зависи от скоростта на вятъра (водата), а $M_{Г}$ - от скоростта на въртене и съпротивлението във веригата на ротора. Необходимият момент на АГНР (за съгласуване с развивания момент на ВД в условията на променливата скорост на въртене ω) се осигурява чрез регулиране на съпротивлението в роторната верига - с блок за определяне на съпротивлението (БОС).



Фиг. 5

Развиваният момент от АГНР зависи обратно-пропорционално на съпротивлението в ротора (R_2) - при зададена скорост на въртене с увеличаване на роторното съпротивление се намалява $M_{Г}$ и съответно обратно. Ветровата турбина (и ВД) постоянно променя своя режим и в зависимост от моментните стойности на $M_{Г}$ и $M_{ВД}$ скоростта се намалява ($M_{ВД} < M_{Г}$), или нараства ($M_{ВД} > M_{Г}$). Критерий за регулиране, за целите на минимизацията на $M_{дин}$, е намаляване на R_2 при $(d\omega/dt) > 0$ или увеличаване на R_2 при $(d\omega/dt) < 0$. В БОС се изчислява стойността на допълнителното съпротивление $R_{2Д}$ според определената скорост на ВД (при зададена скорост на вятъра).

Построяването на желаните механични характеристики, осигуряващи ефективното управление, се извършва в следната последователност:

- При зададена скорост на вятъра J_j (j е в диапазона $J_{нач} \div J_{п}$) се пресмятат $\omega_{ВДj}$ и $M_{ВДj}$ съгласно (9).

$$\omega_{ВДj} = \vartheta_j \cdot Z_H \cdot i / R ;$$

$$M_{ВДj} = \eta_M \cdot M_H^* (Z_H) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \vartheta_j^3 / (2i) \quad (9)$$

- Определят се хлъзгането и скоростта на въртене, при $M_{ВДj}$, от естествената характеристика – (10).

$$S_{ej} = - \frac{S_{ке}}{M_{ВДj}} \left(M_{к} - \sqrt{M_{к}^2 - M_{ВДj}^2} \right) ;$$

$$\omega_{ej} = \omega_0 (1 - S_{ej}) \quad (10)$$

- Пресмятат се допълнителното и сумарното роторни съпротивления.

$$R_{2Дj} = r_2 \frac{\omega_{ej} - \omega_{ВДj}}{\omega_0 - \omega_{ej}} ;$$

$$R_{2\Sigma j} = r_2 + R_{2Дj} \quad (11)$$

- Определя се критичното хлъзгане за изкуствената механична характеристика на генератора и тя се построява с формулата на Клос – (12).

$$S_{kj} = - \frac{R'_{2\Sigma j}}{\sqrt{r_1^2 - x_k^2}} ;$$

$$M = 2M_{к} / (S/S_{к} + S_{к}/S) \quad (12)$$

Характеристиките се представят съвместно с механичните характеристики на ВД в една координатна система - $M_{ВД} \equiv M_{Г}$, $\omega_{ВД} \equiv \omega_{Г}$ - с оглед съгласуването им съобразно избраната цел на управление.

При изследването на динамичните процеси в АГНР се предлага модела (13) - с определящи вектори $\bar{\psi}_1$ и \bar{I}_2 в „x-y” координатна система (свързана с $\bar{U}_1 - \omega_{к} = \omega_0$), при означенията: $\sigma = L_1 L_2 - L_m^2 / (L_1 L_2)$; $k_1 = L_m / L_1$; $T_1 = L_1 / R_1$; $T_2' = \sigma L_2 / R_2 = L_2' / R_2$; $\omega_p = p_n \omega$; $\omega_0 S = \omega_0 - \omega_p$; $C_M = 3 p_n k_1 / 2$.

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = \frac{I + T_1 p}{T_1} \bar{\psi}_1 - k_1 R_1 \bar{I}_2 + j \omega_0 \bar{\psi}_1 \\ \bar{U}_2 = \left(\frac{I + T_2' p}{T_2'} \right) L_2 \bar{I}_2 + k_1 p \bar{\psi}_1 + j \omega_0 S (\bar{I}_2 L_2 + k_1 \bar{\psi}_1) \\ I_1 = \bar{\psi}_1 / L_1 - k_1 \bar{I}_2 \\ \psi_2 = \sigma L_2 \bar{I}_2 + k_1 \bar{\psi}_1 \\ M = C_M \text{Im} [\bar{\psi}_1 \times \bar{I}_2] \end{cases} \quad (13)$$

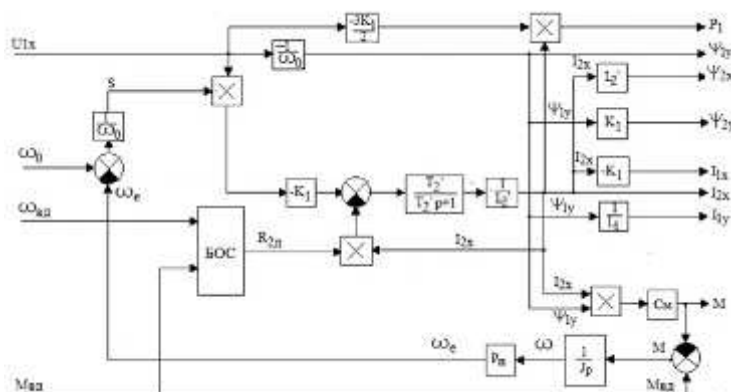
При допусканията: -постоянство на статорното потокосцепление- $\bar{\psi}_1 = \text{cte}$; - пренебрегване на активното съпротивление - $R_1 = 0$; - неотчитане на падението върху индуктивното съпротивление в роторната верига- $jS \omega_0 L_2' \bar{I}_2 = 0$ - моделът (13) приема вида (14) – спрямо съставлящите на променливите (при $U_{1x} = U_1; U_{1y} = 0$).

$$\begin{cases} U_{1x} = -\omega_0 \psi_{1y} \\ U_{1y} = \omega_0 \psi_{1x} = 0 \\ U_{2x} = R_{2\Sigma} I_{2x} + L_2' p I_{2x} - \omega_0 S k_1 \psi_{1y} \\ U_{2y} = R_{2\Sigma} I_{2y} + L_2' p I_{2y} + \omega_0 S k_1 \psi_{1x} = R_{2\Sigma} I_{2y} + L_2' p I_{2y} \\ I_{1x} = \psi_{1x} / L_1 - k_1 I_{2x} = -k_1 I_{2x} \\ I_{1y} = \psi_{1y} / L_1 - k_1 I_{2y} \\ \psi_{2x} = L_2' I_{2x} + k_1 \psi_{1x} = L_2' I_{2x} \\ \psi_{2y} = L_2' I_{2y} + k_1 \psi_{1y} \\ M = C_M (\psi_{1y} I_{2x} - \psi_{1x} I_{2y}) = C_M (\psi_{1y} I_{2x}) \end{cases} \quad (14)$$

В модела (14) $R_{2\Sigma} = r_2 + R_{2Д}$, където r_2 е собственото роторно съпротивление, $R_{2Д}$ е регулируемото външно роторно съпротивление. В разглеждания случай на регулиране чрез $R_{2Д}$ в ротора, в качеството на роторно напрежение се явява допълнителното напрежение върху $R_{2Д}$. При това в третото и четвъртото уравнение на (14) роторните напрежения са $U_{2x} = -R_{2Д} I_{2x}$; $U_{2y} = -R_{2Д} I_{2y}$ и уравненията приемат вида (15).

$$\begin{cases} -R_{2Д} I_{2x} = (r_2 + p L_2') I_{2x} - \omega_0 S k_1 \psi_{1y} \\ -R_{2Д} I_{2y} = (r_2 + p L_2') I_{2y} \end{cases} \quad (15)$$

Структурната схема е показана на фиг.6, където определянето на $R_{2Д}$ се реализира в показания в блоков вид БОС.



Фиг. 6

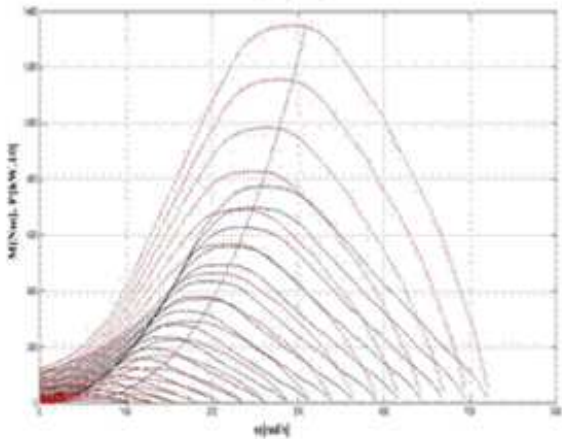
РЕЗУЛТАТИ и ИЗВОДИ

Проведени са симулационни изследвания, разкриващи особеностите при реостатно управление на АГНР. Разглежда се работата на генератора (в отворен контур на ЕГС) при следните условия:

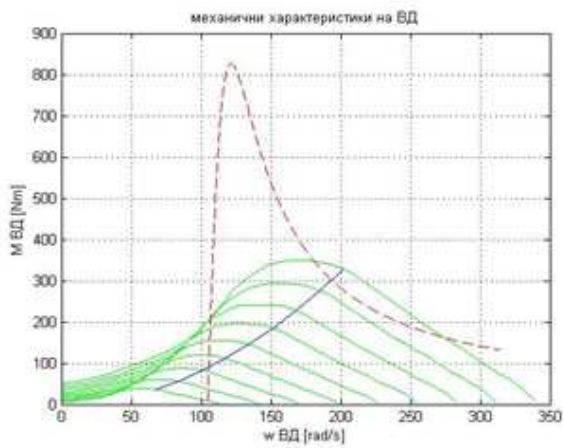
- режимни скорости на вятъра (фиг.3) - $J_{нач} = 4\text{m/s}$; $J_{п} = 12\text{m/s}$; $J_{max} = 20\text{m/s}$;
- данни за ВТ и ВД - аеродинамични характеристики (от фиг.2 - $Z_{п} = 5.8$, $\xi_{max} = 0.45$), $P_{ВТП} = 30\text{kW}$; $\eta_m = 0.92$; $R = 5.4\text{M}$; $i = 18$;
- данни за генератор МТВ 412-6.

Изследванията са проведени с продукта MATLAB. На фиг.7 са показани механичните и мощностни характеристики на ВД в целия диапазон $J_{нач} \div J_{max}$. На фиг.8 са представени

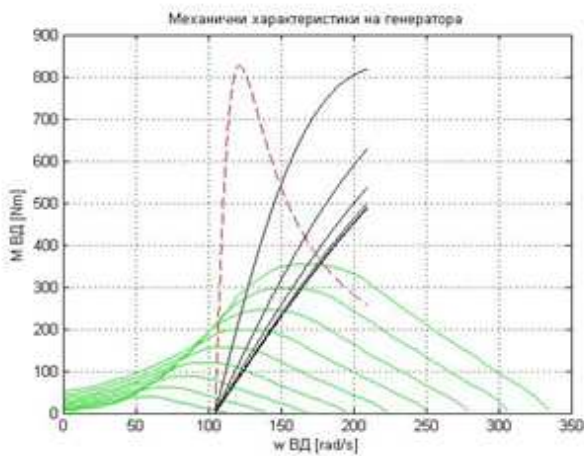
механичните характеристики при $J_{нач} \div J_{п}$, стратегията на управление (теоритично) и естествената характеристика на генератора. При случайни скокообразно и линейно изменение на скоростта на ветровия поток (J), измененията на скоростта и момента на АГНР са илюстрирани съответно с фиг.10 и фиг.11.



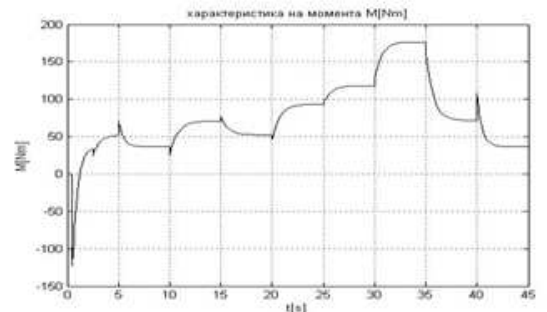
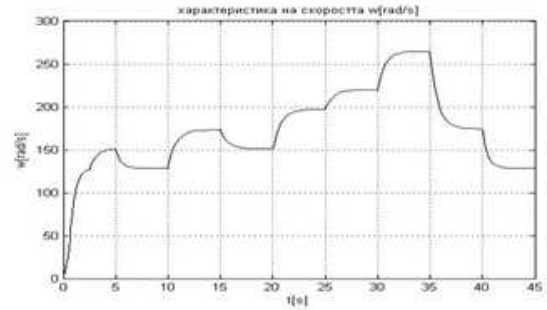
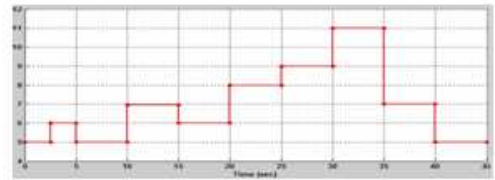
Фиг. 7



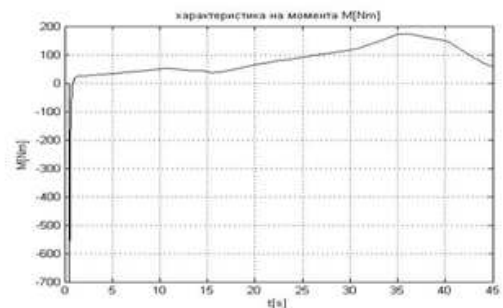
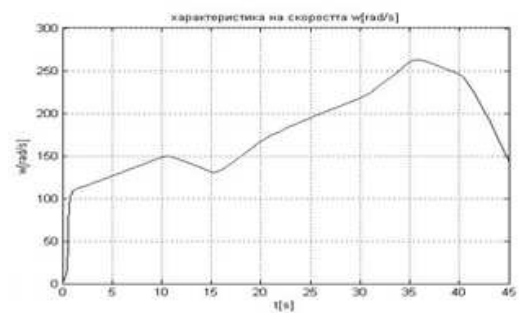
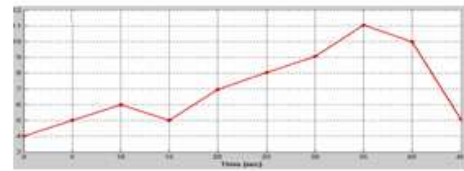
Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11

Анализът на получените резултати от проведените моделни изследвания потвърждава верността на предложения модел ((14), (15), фиг.6) и методиката за построяване на статичните механични характеристики на АГНР. Съгласуването им с характеристиките на ВД осигурява желаното ефективно управление на ЕГС на ВЕА - работа с ξ_{\max} в диапазона $J_{\text{нач}} \div J_{\text{п}}$. Наличието на пикове в измененията на момента се дължи на задаваното скокообразно изменение на скоростта на вятъра (J), което е нереално в действителност - скоростта J на практика се променя случайно и с неголеми отклонения във времето. В този смисъл, тези пикове са резултат на постановката на симулационните изследвания.

Проведените изследвания позволяват изграждането на едноконтурни и многоконтурни структури за управление на ЕГС на ВЕА с използването на АГНР.

ЛИТЕРАТУРА

- [1].Манасиев П.А., Съгласуване на механичните характеристики при управление на ветроенергиен агрегат, „Електротехника и Електроника” 2004г.
- [2].Маринов Е., Манасиев П., Тодоров Ц., Възможности за управление режима на електрогенериране на ветроенергиен агрегат с асинхронна машина с двойно захранване, Годишник на ТУ Варна, 2010.
- [3].Маринов Е.Й., Манасиев П.А., и др., Разработване и изследване на електромеханични системи с подобрени регулировъчни и енергийни показатели” (резюме), Годишник на ТУ Варна т. II-2, Варна, 2009,
- [4]Hofmann W., Thieme A., Control of a Double Fed Induction Generator for Wind – Power Plants, TU Chemnitz, 1998
- [5].Marcelo Gustavo Molina and Pedro Enrique Mercado : Modelling and Control Design of Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbines, 2011
- [6.]Mullane A., G. Lightbody, R. Yacamini, “Adaptive Control of Variables Speed Wind Turbines”, Rev. Energ. Ren.:Power Engineering, 2001

- [7].Pettersson A., Analysis, Modeling and Control of Double Fed – Induction Generators for Wind Turbines, Göteborg, “СИТ” – Sweden, 2003
- [8].Song Y.D., Dhinakaran B., Bao X.Y., “Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000

За контакти:

9010 Варна, ул. “Студентска”1
Технически университет -Варна
д-р инж. Пламен Антонов Манасиев ,
гл.ас. в Катедра ”Автоматизация на
производството” при ФИТА на ТУ-Варна ,
стая 114 УПБ
e-mail: pam50@abv.bg.