

УДК 621.311.24

В.Г. ЧЕРНІКОВ
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
vinodel12@ukr.net

СТАБІЛІЗАЦІЯ ВИХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК З АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ ЗАСОБАМИ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ

Запропоновано систему регулювання активної потужності вітрогенератора зі зміною швидкістю обертання вітроколеса, яка забезпечує режим роботи з заданою потужністю в умовах коливань швидкості вітру, обумовлених як природою вітру, так і ефектом затінення башти. Проведено порівняння якості стабілізації потужності запропонованої системи регулювання при наявності перетворювача частоти з системою, що базується на концепції прямого підключення асинхронного генератора з к.з. ротором до мережі.

Ключові слова: вітрогенераторна установка, асинхронний генератор з короткозамкненим ротором, ефект затінення башти, pitch-кут, передаточна функція, коефіцієнт потужності вітроколеса, швидкохідність, моментотворююча компонента току статора, векторне регулювання.

Постановка проблеми. В останні роки росте потужність вітростанцій та доля вітроенергетики в загальному енергетичному балансі країни. В цих умовах особливе значення має якість електроенергії, яку вітростанції віддають в мережу, та збільшення ефективності використання ВЕУ. Із збільшенням кількості вітрових станцій та їх встановленої потужності виникає ряд питань, які потребують додаткових досліджень. Так при паралельній роботі ВЕС з енергосистемою в ряді випадків не забезпечується якість напруги, яку вимагає ГОСТ 13109-97 із-за коливань потужності, що видається в мережу. Причиною цього може бути як нестабільність швидкості вітру, так і конструктивні особливості вітроустановок. Для рішення цієї задачі актуальним є вдосконалення системи регулювання та розробка методів математичного моделювання режимів роботи ВЕУ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Треба зазначити, що з моменту інтенсивного розвитку вітроенергетики в європейських країнах в наприкінці восьмидесятих років минулого сторіччя, науковці та інженери постійно шукали методи зменшення впливу коливань потужності вітрового потоку на вихідну потужність вітрогенераторних установок. Для вирішення цієї задачі вдосконалювались системи регулювання вітроустановок. На путі вдосконалення систем регулювання можна виділити наступні основні віхи: по-перше, це перехід від способу stall-регулювання до pitch-регулювання потужності, по-друге, це використання вітроустановок зі змінною швидкістю обертання вітроколеса, в яких за рахунок використання перетворювачів частоти забезпечувалась можливість регулювання електромагнітного моменту генератору, що в свою чергу давало можливість використовувати кінетичну енергію вітроколеса для згладжування коливань потужності вітрового потоку. Крім того змінна швидкість обертання давала можливість вітроколесу працювати з максимальним коефіцієнтом потужності в діапазоні швидкостей вітру від стартової до номінальної. У теперішній час концепції установок зі змінною швидкістю обертання вітроколеса переважно реалізуються на основі таких машин змінного струму, як асинхронний генератор подвійного живлення та синхронний генератор [1]. Структура зазначених концепцій вітроустановок наведена на рис. 1

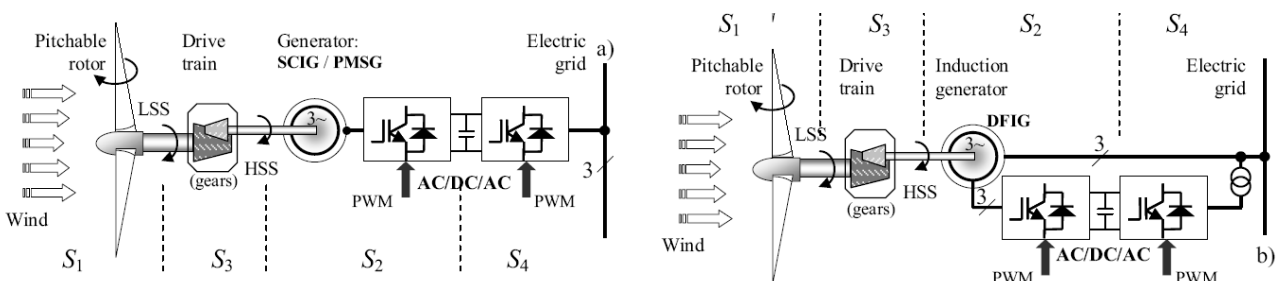


Рисунок 1- Структура концепцій вітрогенераторних установок зі змінною швидкістю обертання вітроколеса: а - на основі синхронного генератора, б - на основі машини подвійного живлення

На рисунку виділені чотири основні структурні одиниці: S1 - аеродинамічна система, S2 – система регулювання електромагнітного моменту генератора, S3 – механічна трансмісія, S4 – система видачі енергії в мережу. Кожна з наведених концепцій не є ідеальною та має свої переваги та недоліки. В якості переваг концепції вітроустановки з використанням синхронного генератора можна назвати відсутність

© Черніков В.Г., 2013

струмозмінальних кілець, можливість безредукторного виконання та більша глибина регулювання швидкості обертання (1:4), недоліками є висока вартість генератору та використання перетворювача частоти на повну потужність генератору. Перевагами концепції з використанням машини подвійного живлення є більш дешевий генератор та використання перетворювача з потужністю рівною 40÷50% потужності вітроустановки, недоліки цієї концепції – неможливість безредукторного виконання, наявність струмозмінальних кілець та менша глибина регулювання швидкості обертання (1:2) [2].

Треба зауважити, що концепція вітроустановки зі змінною швидкістю обертання вітроколеса на базі асинхронного генератору з короткозамкненим ротором в теперішній час практично не використовується по причині пізнішого втілення принципів векторного регулювання, які забезпечують регулювання моменту генератору, порівняно з початком розвитку систем регулювання вітроустановок. Між тим відомо, що асинхронний генератор з к. з. ротором вважається найбільш дешевою, невибагливою та надійною машиною, яка у разі захищеного виконання найбільш підходить для умов роботи вітроустановок на морських узбережжях. Крім того, можна констатувати, що до 2011 року саме асинхронний генератор з к.з. ротором складав основу українських установок USW-56-100 та Turbowinds T600-48, в яких був реалізований принцип прямого підключення до мережі. З всього вищесказаного витікає ціль статті.

Ціль статті. Синтезувати систему регулювання вітрогенераторної установки на базі асинхронного генератору з к.з. ротором, яка здатна забезпечувати як режим роботи з максимальним коефіцієнтом потужності вітроколеса, так і режим стабілізації потужності, шляхом використання принципів векторного регулювання. Використовуючи методи математичного моделювання порівняти якість стабілізації потужності запропонованої системи регулювання з можливостями стабілізації потужності концепції прямого підключення асинхронного генератору з к.з. ротором до мережі.

Виклад основного матеріалу: Перед початком аналізу динамічних властивостей системи регулювання слід у першу чергу проаналізувати природу коливань потужності вітроколеса, які спричиняються як властивостями вітрового потоку, так і конструктивними особливостями вітроустановок. В [1] показано, що поведінка швидкості вітрового потоку може бути описана як сума низькочастотної та турбулентної компонент згідно спектральної моделі Ван дер Ховена по наступній формулі:

$$v(t) = v_s(t) + v_t(t), \quad (1)$$

де v_s – низькочастотна компонента; v_t – турбулентна компонента швидкості вітру.

При чому, як показано в [1] низькочастотна компонента може змінюватись з періодами коливань від кількох годин до кількох днів, та її можна вважати приблизно незмінною впродовж 10 хвилин, а турбулентна компонента може змінюватись з періодами коливань від кількох хвилин до кількох секунд.

Промоделювати поведінку швидкості вітру при незмінній впродовж 10 хвилин низькочастотній компоненті та змінній турбулентній компоненті можна, використовуючи наведену на рис. 2а структурну схему.

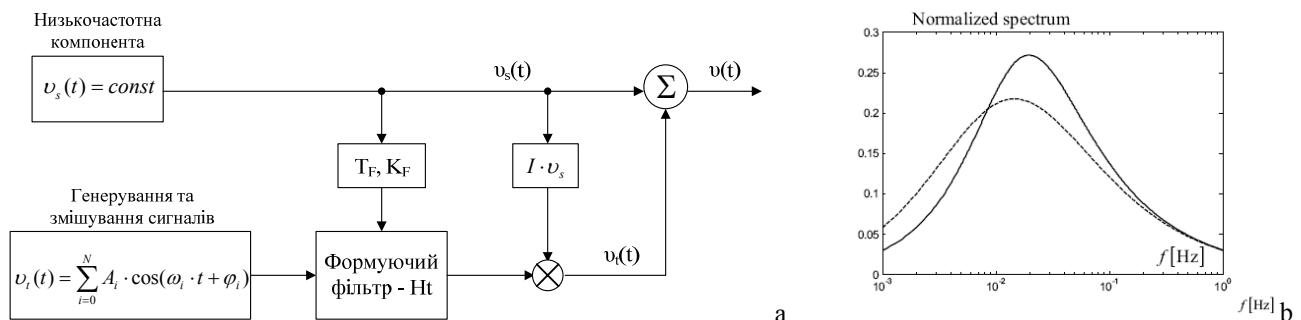


Рисунок 2 – а) Структурна схема для моделювання поведінки швидкості вітру впродовж 10-хвилинного інтервалу часу; б) Добуток спектральної щільності потужності та частоти коливань

Згідно рис. 2а турбулентна компонента швидкості вітру представлена як суміш косинусоїд з випадковою фазою в діапазоні $[-\pi, \pi]$, частотою f в діапазоні $f=10^{-3}\div 10^0$ Гц та амплітудою, яка може бути поражена по наступній формулі

$$A_i = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} ((S_{vv}(\omega_i) + S_{vv}(\omega_{i+1})) \cdot (\omega_{i+1} - \omega_i))}, \quad (2)$$

де A_i – амплітуда коливань; S_{vv} – спектральна щільність потужності коливань, яка відповідає рис. 2б; ω_i – частота коливань.

При моделюванні використовується також передаточна функція формуючого фільтру $H_t(p)$ згідно формулі:

$$H_t(p) = K_F \cdot \frac{m_1 \cdot T_F \cdot p + 1}{(T_F \cdot p + 1) \cdot (m_2 \cdot T_F \cdot p + 1)}, \quad m_1 = 0,4; \quad m_2 = 0,25, \quad (3)$$

де K_F T_F коефіцієнт підсилення та постійна часу формуючого фільтру відповідно.

Також повинна враховуватись інтенсивність турбулентності I згідно формулі:

$$I_t = \frac{1}{\ln(h/z_0)}, \quad (4)$$

де h – висота над землею, z_0 – коефіцієнт шорсткості земної поверхні.

В результаті моделювання проведеного за допомогою програмного пакету Matlab згідно структурній схемі, наведеній на рис. 2а, був отриманий характер поведінки швидкості вітру впродовж 10-хвилинного інтервалу часу. Результати моделювання наведені на рис. 3.

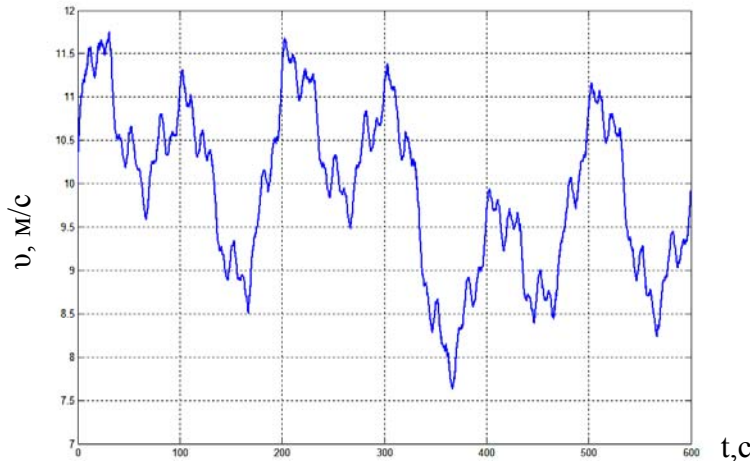


Рисунок 3 – Поведінка швидкості вітру згідно з моделлю Ван дер Ховена ($h=30\text{м}$, $v_s=10\text{м/с}$, $z_0=0,01\text{м}$) впродовж 10-хвилинного інтервалу часу

швидкості обертання вітроколеса. Треба зауважити, що така частота значно підсилює вплив збурюючого фактору на систему регулювання. Для реальної оцінки впливу ефекту затінення башти на вихідну потужність були проведені заміри вихідної потужності вітроустановки TURBOWINDS T600-48 на Новоазовській ВЕС за допомогою прибору-реєстратору «РЕКОН-08МС». Результати замірів наведені на рис. 4.

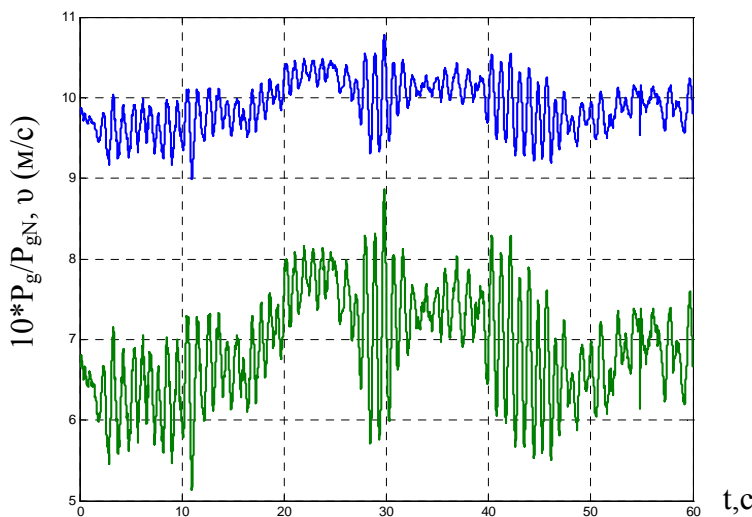


Рисунок 4 – Графік змін активної потужності генератору та розрахованої швидкості вітру впродовж хвилинного інтервалу часу з урахуванням ефекту затінення башти

Можна сказати, що розрахована таким чином узагальнююча швидкість вітру, втілює в собі як природні коливання вітру, так і прояви ефекту затінення башти. Таким чином саме цю розраховану швидкість вітру слід використовувати для тестування динамічних властивостей системи стабілізації потужності вітроустановки.

Структурна схема контуру регулювання моменту генератору [5], який виконує завдання стабілізації потужності для вітроустановки з прямим підключенням генератору до мережі, наведена на рис. 5. В цій системі регулювання засобом впливу на аеродинамічний момент вітроколеса є керуючий сигнал регулятора, який представляє собою задане значення pitch-кута лопати.

Але не зважаючи на свою складність, спектральна модель Ван дер Ховена не відтворює всіх факторів, які призводять до коливання приводного моменту на валу вітроколеса. Одним з таких факторів є безумовно ефект затінення башти. Періодичні зміни приводного моменту вітроколеса, спричинені ефектом затінення башти, також можна сприймати як наслідки коливань швидкості вітру, хоча причина цих коливань знаходиться не в природі вітру, а в особливостях конструкції вітроустановки. Саме завдяки особливостям конструкції лопати вітроколеса по черзі перетинають зону затінення трубчастої башти, опиняючись в безвітряній зоні. Це й призводить до коливань моменту вітроколеса на частоті $1 \div 2$ Гц, в залежності від

На графіку можна побачити домінуючі коливання з частотою приблизно 1 Гц, точне значення якої можна розрахувати по наступній формулі:

$$f_k = \frac{N_{bl} \cdot n_g}{60 \cdot u_r}, \quad (5)$$

де N_{bl} – кількість лопат вітроколеса; n_g – швидкість обертання генератору об/хв.; u_r – передавальне число редуктору.

Спираючись на графік поведінки активної потужності вітрогенератору можна розрахувати значення узагальнюючої швидкості вітру згідно з формулою:

$$v = \sqrt[3]{\frac{P_g}{0,49 \cdot c_{pw} \cdot D^2 \cdot \eta_g}}, \quad (6)$$

де P_g – заміряна активна потужність генератору, c_{pw} – коефіцієнт потужності вітроколеса, D – діаметр вітроколеса, η_g – к.к.д. генератору.

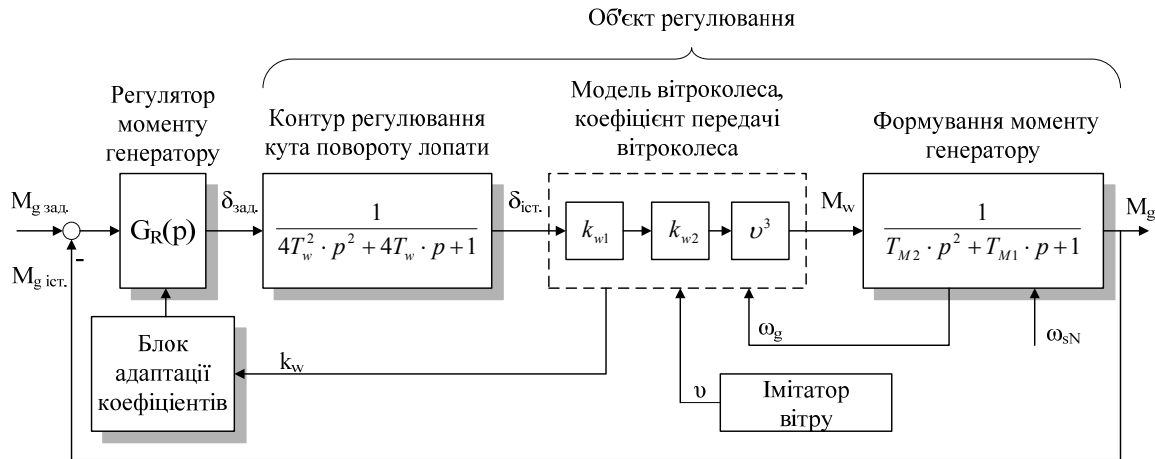


Рисунок 5 – Структурна схема узагальненого контуру регулювання моменту для вітрогенератору з прямим підключенням до мережі

Об'єктом регулювання в даному контурі є ланка четвертого порядку з нелінійними коефіцієнтами в чисельнику, яка є сукупністю контуру регулювання установочного кута лопати (pitch-кута), коефіцієнтів передачі в моделі вітроколеса та ланки, що описує зв'язок між моментом вітроколеса та моментом генератору. Враховуючи на те, що для зміни pitch-кута лопати використовуються електроприводи, постійну часу в контурах регулювання швидкості повороту лопати – T_w можна прийняти рівною 15ms, постійні часу T_{M1} та T_{M2} можна розрахувати згідно наступних формул [5]:

$$T_{M1} = \frac{J_{\Sigma}}{k_m \cdot z_p}; T_{M2} = \frac{J_{\Sigma} \cdot T_r \cdot \sigma}{k_m \cdot z_p}; k_m = \frac{3 \cdot z_p}{2 \cdot R_r} \cdot \left(\frac{k_s \cdot U_{sN}}{\omega_{sN}} \right)^2, \quad (7)$$

де J_{Σ} – сумарний момент інерції вітроколеса разом з генератором; z_p – кількість пар полюсів генератору; T_r – постійна часу ротору; σ – коефіцієнт розсіювання R_r – активний опір ротору; k_s – коефіцієнт зв'язку між статором і ротором; U_{sN} – номінальна напруга статора; ω_{sN} – номінальна частота генератору.

У разі використання даних генератору АВГ 280M40M2 та вітроколеса, які застосовуються на вітроустановці USW 56-100 отримаємо наступні значення наведених коефіцієнтів: $J_{\Sigma}=20$ кг·м²; $k_m=255,5$; $\sigma \cdot T_r=0,059$; $T_{M1}=0,037$; $T_{M2}=0,0022$.

Для такого об'єкту регулювання в якості регулятора моменту генератору доцільно використання ПИД-регулятора з можливістю адаптації до змін нелінійного коефіцієнта в моделі вітроколеса [5]. Передаточна функція та коефіцієнти регулятора можуть бути визначені по принципу симетричного оптимуму згідно наступної формули для мінімізації впливу коливань швидкості вітру на вихідну потужність генератору:

$$G_R(p) = \frac{(1 + T_{R1} \cdot p) \cdot (1 + T_{R2} \cdot p)}{T_0 \cdot p}; T_{R1} = 4 \cdot T_w; T_{R2} = \frac{4 \cdot T_{M2}}{T_{M1}} - \frac{8 \cdot T_{M2}^2}{T_{M1}^3}; T_0 = \frac{8 \cdot k_w \cdot T_{M2}^2}{T_{M1}^3}, \quad (8)$$

Але при підстановці значень параметрів T_{M1} та T_{M2} в формулу (8) для розрахунку коефіцієнту регулятора T_{R2} отримаємо негативне значення, що робить неможливим настройку на симетричний оптимум. В такому разі слід скористатися методом Чіна, Хронеса та Ресвіка, який дозволяє по параметрам перехідної функції об'єкту регулювання, див. рис. 6, розрахувати параметри регулятора, згідно наступного виразу:

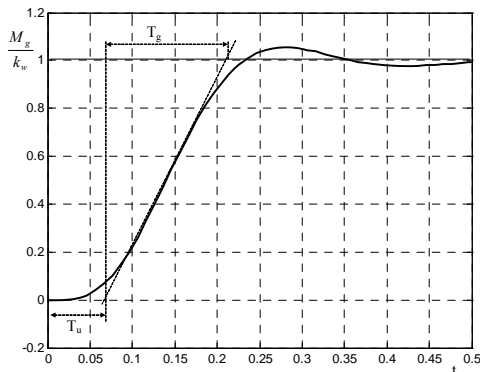


Рисунок 6 – Параметри перехідної функції об'єкту регулювання

$$G_R(p) = k_R \cdot \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot p} + T_V \cdot p \right); k_R = 0,95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot k_w}$$

$$T_N = 1,35 \cdot T_g; T_V = 0,47 \cdot T_u \quad (9)$$

Результати моделювання процесу стабілізації моменту генератору в програмному пакеті Matlab з використанням імітатора вітру згідно рис. 4 та структурної схеми згідно рис.5 наведені на рис. 7. Характер перехідних процесів показує, що регулятор усуває коливання моменту на частотах 0,1÷0,01 Гц, але йому не вдається впогортати з коливаннями моменту на частоті приблизно 1 Гц, які обумовлені ефектом затінення башти, по причині порівнянних значень періоду коливань та постійної часу в об'єкті регулювання, а також коливального характеру об'єкту регулювання.

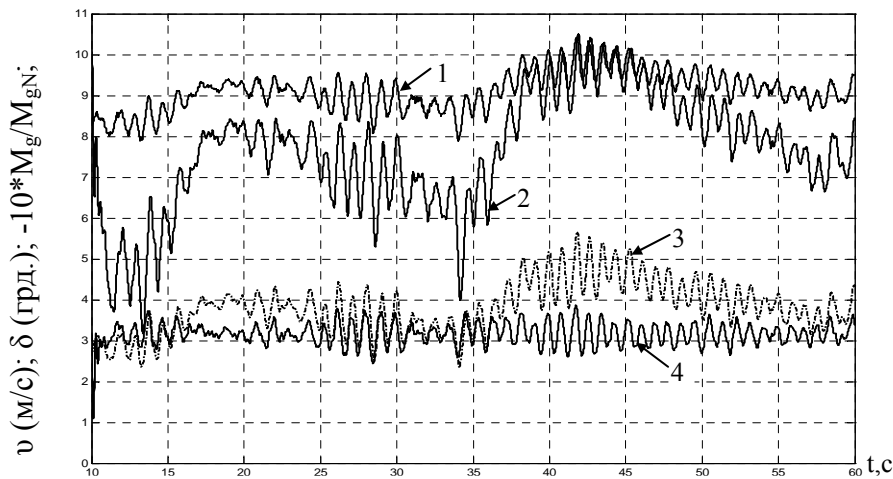


Рисунок 7 - Процес стабілізації моменту генератору за рахунку регулювання установочного кута лопати при змінній швидкості вітру ($v_{cp} \approx 9$ м/с), 1- швидкість вітру, 2- відхилення установочного кута лопати від оптимального положення під час регулювання, 3 та 4- поведінка моменту генератору без регулювання ($\delta=6^\circ$) та із залученням системи стабілізації відповідно

Отже для забезпечення компенсації коливань потужності вітрового потоку необхідно використовувати більш швидкодіючу систему регулювання, бо механічна система регулювання pitch-кута неспроможна забезпечити якісну стабілізацію вихідної потужності. Для вирішення цієї задачі доцільно використати швидкодіючу систему векторного регулювання, структурна схема якої наведена на рис.8.

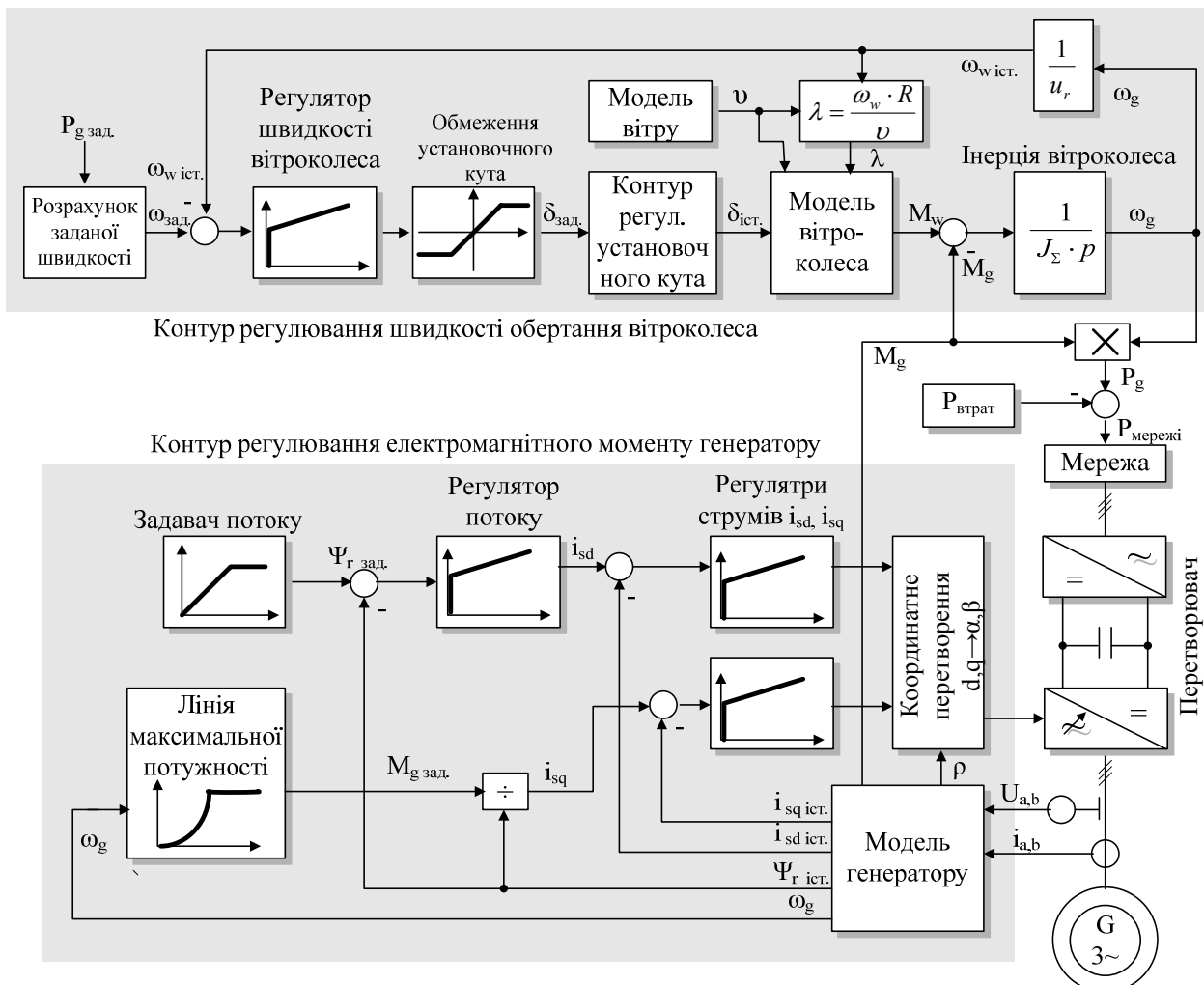


Рисунок 8 - Структурна схема двоконтурної системи стабілізації активної потужності вітроустановки

Наведена система регулювання може застосовуватись для вітроустановки на базі асинхронного генератору з к.з. ротором зі змінною швидкістю обертання вітроколеса, що забезпечується за рахунок використання перетворювача частоти. В цій системі завдання регулювання швидкості обертання вітроколеса, та моменту генератору розділені між двома контурами.

Регулювання швидкості обертання вітроколеса здійснюється за рахунок зміни pitch-кута верхнім контуром, а регулювання моменту генератору здійснюється за рахунок впливу на моментоутворюючу компоненту току статору i_{sq} за умови підтримки постійного значення потоку ротору Ψ_r . Регулювання моменту здійснюється в обертовій системі координат d-q, речовинна вісь d якої пов'язана з вектором потоку ротору. Необхідні зворотні зв'язки в системі регулювання забезпечуються моделлю генератору, яка базується на рівняннях статору та ротору асинхронної машини, записаних для обертової системи координат [3]:

$$i_{sd} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1+p \cdot \sigma \cdot T_s} \cdot (U_{sd} - E_{sd}); \quad E_{sd} = p \cdot k_r \cdot \Psi_r - \omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{sq}, \quad (10)$$

$$i_{sq} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1+p \cdot \sigma \cdot T_s} \cdot (U_{sq} - E_{sq}); \quad E_{sq} = \omega_s \cdot k_r \cdot \Psi_r + \omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{sd}, \quad (11)$$

$$\Psi_r = \frac{L_h}{1+p \cdot T_r} \cdot i_{sd}; \quad M_g = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot k_r \cdot \Psi_r \cdot i_{sq}, \quad (12)$$

де U_{sd} E_{sd} i_{sd} – проекції векторів напруги, електрорушійної сили та струму вісь d системи координат; U_{sq} E_{sq} i_{sq} – проекції векторів напруги, електрорушійної сили та струму вісь q системи координат; L_s L_r L_h – індуктивності статору, ротору та контуру намагнічування; T_s T_r – постійні часу статору та ротору; R_s – опір статору.

Особливістю наведеної системи регулювання є зв'язок між швидкістю обертання та завданням моменту генератору, який здійснюється через лінію максимальної потужності вітроколеса згідно виразів:

$$M_{g \max} = \frac{0,49 \cdot c_{pw \max} \cdot D^2 \cdot v_{gN}^3 \cdot \omega_g^2}{\omega_{gN}^3}; \quad \omega_{g\zeta\alpha\alpha} = \frac{\omega_{gN}}{v_{gN}} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{g\zeta\alpha\alpha}}{0,49 \cdot c_{pw \max} \cdot D^2}} \quad (13)$$

де ω_g та ω_{gN} – відповідно поточна та номінальна швидкість генератору; v_{gN} – номінальна швидкість вітру установки, $P_{g\zeta\alpha\alpha}$ – задана активна потужність; $\omega_{g\zeta\alpha\alpha}$ – задана швидкість обертання вітроколеса; $c_{pw \max}$ – максимальний коефіцієнт потужності вітроколеса.

Передаточна функція та значення коефіцієнтів регуляторів моментоутворюючої та потокоутворюючої компонент струму статору визначаються згідно модульного оптимуму по наступним формулам [4]:

$$G_{Rid}(p) = G_{Riq}(p) = \frac{1+p \cdot T_{i1}}{T_{i2} \cdot p}; \quad T_{i1} = \sigma \cdot T_s; \quad T_{i2} = \frac{2 \cdot T_{i\delta} \cdot k_{i\delta}}{R_s}, \quad (14)$$

де T_{ip} – мала постійна часу перетворювача частоти, k_{ip} – коефіцієнт передачі перетворювача частоти.

Зважаючи на мале значення постійної часу сучасних перетворювачів частоти, які працюють з високими частотами модуляції до 20 кГц, контур регулювання моментоутворюючої компоненти струму статору має велику швидкодію, яка є достатньою для компенсації коливань збурюючого впливу.

Передаточна функція та коефіцієнти регулятора потоку визначають також згідно модульного оптимуму:

$$G_{R\psi}(p) = \frac{1+p \cdot T_{\psi 1}}{p \cdot T_{\psi 2}}; \quad T_{\psi 1} = T_r; \quad T_{\psi 2} = 4 \cdot T_{i\delta} \cdot L_h \quad (15)$$

Передаточна функція та значення коефіцієнтів регулятора швидкості обертання вітроколеса визначаються згідно симетричного оптимуму:

$$G_{Rn}(p) = \frac{1+T_{n1} \cdot p}{T_{n2} \cdot p}; \quad T_{n1} = 17 \cdot T_w; \quad T_{n2} = \frac{136 \cdot T_w^2 \cdot k_w}{J_\Sigma}, \quad (16)$$

де k_w – коефіцієнт передачі моделі вітроколеса, який зв'язує значення установочного кута лопати зі значенням моменту вітроколеса, причому значення цього коефіцієнту повинно постійно визначатися системою по причині нелінійної залежності коефіцієнта потужності вітроколеса - c_{pw} від установочного кута лопати δ .

Після застосування коефіцієнтів регулятора згідно формули (16) можна отримати значення передаточної функції замкненого контуру регулювання швидкості обертання вітроколеса по відношенню до збурюючого впливу, яким є коливання моменту вітроколеса обумовленні коливаннями швидкості вітру. Цей контур представляє собою ланку 3-ого порядку, але після спрощення його передаточна функція набуває вид:

$$G_n(p) \approx \frac{1}{J_\Sigma} \cdot \frac{136 \cdot T_w^2 \cdot p}{17 \cdot T_w \cdot p + 1} \quad (17)$$

За умови припущення, що сигнал збурюючого впливу змінюється по закону близькому до синусоїдального з частотою коливань обумовленою ефектом затінення башти, див. рис.4, на основі передаточної функції (17) можна скласти диференціальне рівняння, яке буде зв'язувати швидкість обертання вітроколеса ω_w з амплітудою A та частотою коливань ω_k збурюючого впливу:

$$\frac{d\omega_w(t)}{dt} + \frac{1}{17 \cdot T_w} \cdot \omega_w(t) = \frac{8 \cdot A \cdot \omega_k \cdot T_w}{J_\Sigma} \cdot \cos(\omega_k \cdot t) \quad (18)$$

Вирішив наведене рівняння (18) відносно швидкості обертання вітроколеса – $\omega(t)$ можна отримати вираз:

$$\omega_w(t) = \frac{8 \cdot A \cdot \omega_k \cdot T_w}{J_\Sigma} \cdot \left(\frac{\frac{1}{17 \cdot T_w} \cos(\omega_k \cdot t) + \omega_k \sin(\omega_k \cdot t)}{\left(\frac{1}{17 \cdot T_w}\right)^2 + \omega_k^2} \right) \quad (19)$$

Амплітуда коливань збурюючого впливу, спричинених ефектом затінення башти, може сягати величини приблизно 15% від значення номінального моменту вітроколеса при зниженні швидкості вітру в секторі затінення в 2 рази. Отже при частоті коливань збурення - $f_k \approx 1$ Гц, постійній часу контуру швидкості повороту лопати - $T_w = 0,015$ с та сумарному моменті інерції вітроколеса - $J_\Sigma = 20$ кг*м² на основі формули (19) можна оцінити амплітуду коливань швидкості обертання генератора, яка буде дорівнювати приблизно 0,3% від його номінальної швидкості. Оскільки сигнал швидкості обертання генератора формує завдання на його момент, див. формулу (13), коливання швидкості генератора в третьому ступені будуть відображатися на коливаннях активної потужності, яка визначається виразом - $P_g = M_g \cdot \omega_g$. При зазначеному рівні амплітуди коливань швидкості обертання - 0,3%, амплітуда коливань активної потужності не перевищить значення 1%.

Результати моделювання процесу стабілізації потужності генератора при коливаннях швидкості вітру відповідно рис. 4 в програмному пакеті Matlab продемонстровані на рисунку 9.

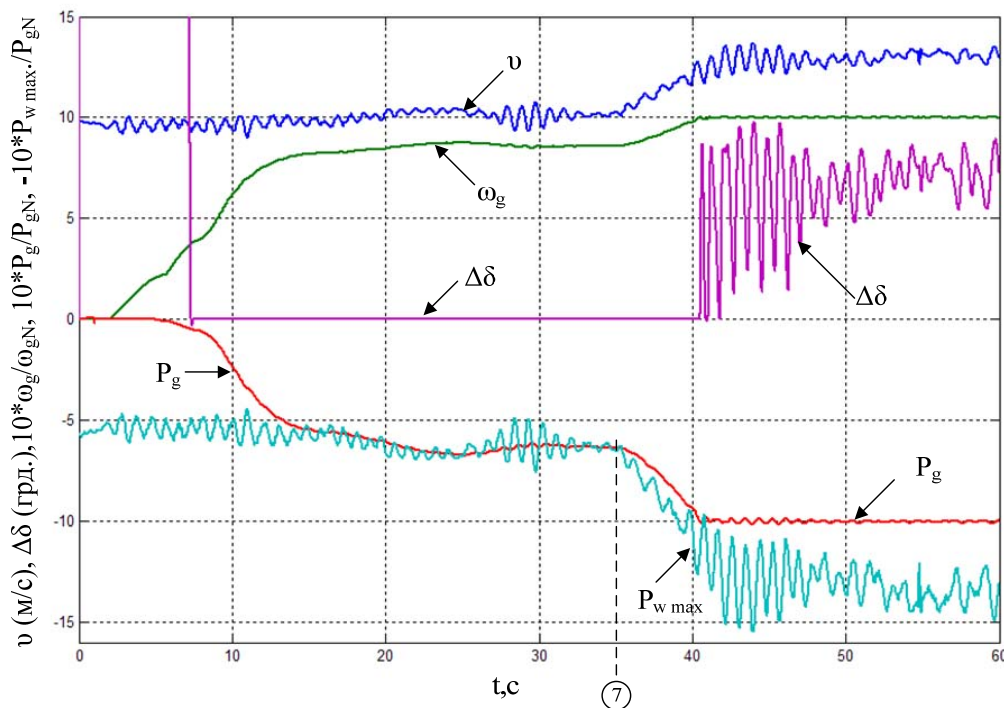


Рисунок 9 - Характер змін швидкості - ω_g та потужності - P_g , генератора, максимальної потужності вітроколеса - $P_{w \max}$ та pitch-кута- $\Delta\delta$ під час стабілізації потужності в двоконтурній системі регулювання

Результати моделювання демонструють, що запропонована система регулювання, яка до пунктирної лінії працювала в режимі відбору максимальної потужності, при збільшенні швидкості вітру до рівня вище номінальної перейшла в режим стабілізації потужності. В цьому режимі швидкість обертання генератора утримується регулюванням pitch-кута, а стабільність активної потужності забезпечується швидкодіючою системою векторного регулювання моменту генератора.

Висновки. Використання двоконтурної системи стабілізації потужності вітроустановки, в якій функції регулювання швидкості обертання вітроколеса та моменту генератора розподілені між системою pitch-регулювання та системою векторного регулювання відповідно, дозволяє знизити рівень коливань активної потужності генератора, обумовлених по більшій мірі ефектом затінення башти, приблизно на порядок порівняно з концепцією прямого підключення асинхронного генератора з к.з. ротором до мережі, що безумовно позитивно позначається на якості мережевої напруги з точки зору відповідності її вимогам ГОСТ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Optimal Control of Wind Energy Systems/ Iulian Munteanu, A.I. Bratsu, N.A. Cutululis, E. Ceanga - London: Springer, 2008. - 283 p.

2. M. Stiebler Wind Energy Systems for Electric Power Generation/ Manfred Stiebler. – Berlin: Springer-Verlag, 2008. – 193 p.
3. Riefenstahl U. Elektrische Antriebstechnik / Riefenstahl Ulrich. – Leipzig: B. G. Teubner Stuttgart, 2000.- 401 p.
4. N. P. Quang Praxis der feldorientierten Drehstromantriebsregelungen/ N.P. Quang, J.A. Dittrich. – Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 1999. – 259 p.
5. Звіт про науково-дослідну роботу № держ. реєстрації 0107U001481 Оптимізація режимів роботи вітрогенераторних установок із застосуванням нейро-адаптивного регулятора потужності та системи векторного регулювання моменту асинхронного генератору - Донецьк: ДонНТУ, 2008. – 268 с.

REFERENCES

1. Iulian Munteanu, A.I. Bratsu, N.A. Cutululis, E. Ceanga Optimal Control of Wind Energy Systems. - London: Springer, 2008. – 283 p.
2. M. Stiebler Wind Energy Systems for Electric Power Generation. – Berlin: Springer-Verlag, 2008. – 193 p.
3. Riefenstahl U. Elektrische Antriebstechnik [Electric drive technics]– Leipzig: B. G. Teubner Stuttgart, 2000. – 401 p.
4. N. P. Quang Praxis der feldorientierten Drehstromantriebsregelungen [Practice of control in fielddirect alternate current drive] – Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 1999. – 259 p.
5. Scientific report № 0107U001481 Optimization of operating regime of wind turbine generators with application of neuro-adaptive power regulator and vector control system of induction generator torque. Donetsk: DVNZ “DonNTU”, 2008. 268 p.

Надійшла до редакції 21.03.2013

Рецензент: В.Ф. Сивокобиленко

В.Г. ЧЕРНИКОВ

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»

Стабилизация выходной мощности ветрогенераторных установок с асинхронным генератором средствами системы регулирования. Предложена система регулирования активной мощности ветрогенератора с переменной скоростью вращения ветроколеса, которая обеспечивает режим работы с заданной мощностью в условиях колебаний скорости ветра, обусловленных как природой ветра, так и эффектом затенения башни. Проведено сравнение качества стабилизации мощности предложенной системы регулирования при наличии преобразователя частоты с системой, которая базируется на концепции прямого подключения асинхронного генератора с к.з. ротором к сети.

Ключевые слова: ветрогенераторная установка, асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором, эффект затенения башни, pitch-угол, передаточная функция, коэффициент мощности ветроколеса, быстросходность, моментобразующая компонента тока статора, векторное регулирование.

V. CHERNIKOV

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

Stabilization of Output Power of Wind Generator on the Basis of Induction Generator by Means of Control System. For the last years the number of wind power station in Ukraine have increased, therefore great attention is paid to the power quality, which they generate. The reasons for power oscillation are wind properties and peculiarity of unit construction. The concept of modern wind power units are analyzed and the advantages of the squirrel-cage induction generator usage are pointed out in the article. The spectral model of the wind speed, which describes wind behavior during 10-minute time interval is analyzed. The results of active power measuring of wind turbine generators Turbowinds T600-48, which demonstrate essential influence of tower shadow effects on the wind turbine operating, are given. This effect leads to power oscillation with the frequency of about 1 Hz and this should be taken into account by simulation of operating regime. Further on, the comparison of power stabilization quality by the direct connection of wind generator to network and indirect connection of generator with variable speed by means of frequency converter is provided. The impossibility of the elimination of power oscillation with the frequency of about 1 Hz because of insufficient performance mechanical system of pitch-control is shown by simulation of control system operation by direct connection of wind generator. The double contour system, where one contour regulates wind wheel rotational velocity by means of pitch-angle change and the second contour regulates electromagnetic torque of generators, is introduced for elimination of power oscillation. Generator torque is regulated by means of the vector control system. Simulation results show, that the double contour system can function both in operating regime with the maximum power, and in power stabilization regime. Power oscillation level decreases to 1 percent by using double contour control system.

Key words: wind turbine generators, squirrel-cage induction generator, tower shadow effects, pitch-angle, transfer function, power coefficient of wind wheel, tip speed ratio, vector control, electromagnetic torque.