

Janusz Szwabowski, Jan Słuszkiewicz
Henryk Szupiański

BADANIA NAD IDENTYFIKACJĄ PROCESU MIESZANIA
MASY BETONOWEJ DLA POTRZEB AUTOMATYCZNEGO
STEROWANIA KONSYSTENCJI

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań procesu mieszania masy betonowej dla potrzeb automatyzacji układu sterowania konsystencji. W oparciu o przeprowadzone badania zaproponowano układ pracujący na zasadzie wykrywania ekstremum mocy czynnej pobieranej przez silnik betoniarki.

1. Wstęp

Proces produkcji masy betonowej w skali przemysłowej jest obecnie całkowicie zmechanizowany oraz częściowo zautomatyzowany. Automatyzacja dotyczy jednak głównie dozowania składników w oparciu o pomiar wilgotności kruszywa. Ponieważ jednak celem procesu mieszania składników jest otrzymanie masy betonowej o określonej konsystencji, stąd automatyczne dozowanie winno być częścią automatycznego sterowania konsystencji. Ponadto stałość zadanej konsystencji każdego zarobu w produkcji masy betonowej jest bardzo ważna dla prawidłowego formowania, zagęszczenia i własności mechanicznych elementów betonowych, szczególnie w technologii "Pras-bet".

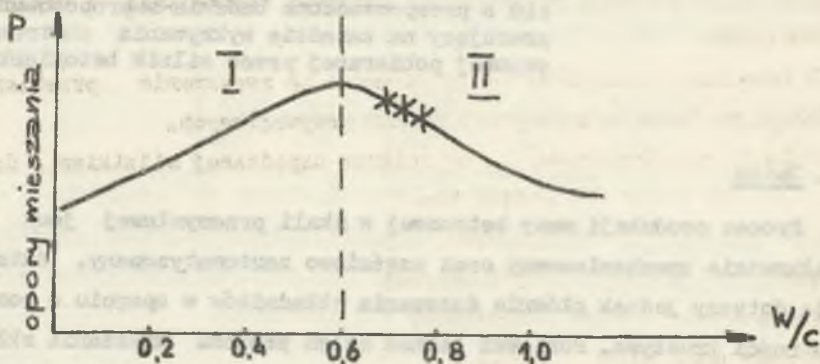
Prace prowadzone przy współudziale pracowników Instytutu Technologii i Organizacji Budownictwa oraz Instytutu Konstrukcji i Technologii Urządzeń Automatyki i Elektroniki miały na celu zbadanie możliwości automatyzacji sterowania konsystencji masy betonowej w oparciu o pomiar oporów mieszania. Badania przeprowadzono na betoniarce o pojemn. 350 l

napędzanej silnikiem asynchronicznym trójfazowym zwartym, dla mas na kruszywie łupkoporytowym i granitowym.

2. Koncepcja ogólna układu sterowania konsystencji masy betonowej

Z przeprowadzonych badań [1, 2, 3] wynika, że opory mieszania masy betonowej zależą od jej konsystencji, a właściwie od ilości wody w masie. Zmiany oporów mieszania w funkcji stosunku wagowego wody do cementu wykazują przy tym następującą prawidłowość:

ze wzrostem ilości wody opory mieszania masy betonowej rosną (krzywa I rys. 1), osiągając przy pewnym stosunku w/c maksimum, a przy dalszym dozowaniu wody maleją (krzywa II rys. 1).



Rys. 1. Charakter zmian oporów mieszania masy w funkcji jej nawodnienia

Badania masy betonowej wykazały, że przy pewnym stosunku w/c, konsystencja betonu posiada najlepsze właściwości dla prawidłowego przebiegu procesów transportu, formowania i zagęszczania masy betonowej w przemysłowych procesach prefabrykacji. Warunek ten ma również zasadnicze znaczenie dla niezmienności cech mechanicznych stwardniałego betonu.

Na podstawie przytoczonej literatury wynika również, że strefa tej konsystencji jest przy stosunku w/c leżącym nieco poza punktem maksimum oporów mieszania idąc w kierunku wzrostu w/c (strefa zakreskowana na rys. 1).

W związku z tym ustalono taki program badań i pomiarów, aby stwierdzić, czy jeśli konsystencja mieszanej masy betonowej jest jedynie funkcją zawartej ilości wody, to analogiem konsystencji masy betonowej w trakcie mieszania mogą być wielkości odzwierciedlające zmiany oporów mieszania, czyli:

- zmiany prędkości obrotowej silnika napędzającego mieszadło
- zmiany prądu fazowego pobieranego przez silnik betoniarki
- zmiany mocy czynnej pobieranej przez silnik betoniarki.

3. Pomiary i badania

Badania przeprowadzono dla mas na bazie kruszywa granitowego oraz aglomeratu dla różnych receptur dozowania składników masy betonowej zgodnie z technologią podaną przez Instytut Technologii i Organizacji Badawnictwa.

W badaniach szczególną uwagę zwracano na rozeszenie przebiegów w próbkach na bazie aglomeratu z żupków przywęglowych.

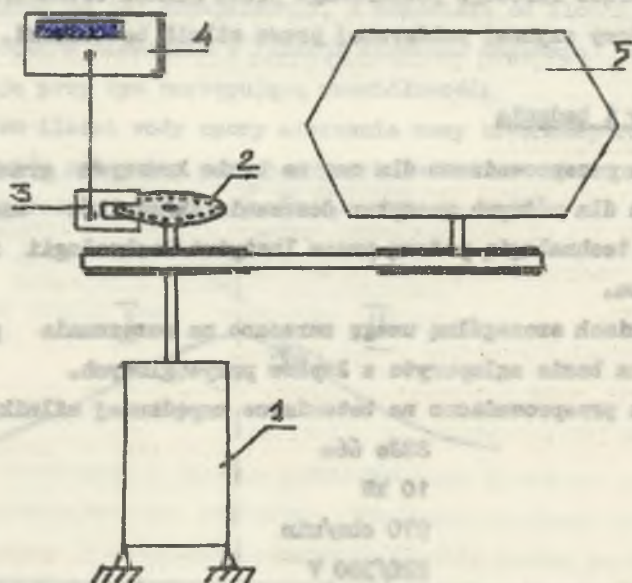
Badania przeprowadzono na betoniarce napędzanej silnikiem o danych:

typ	SZJe 66a
moc	10 kW
obroty	970 obr/min
napięcie	220/380 V
prąd przy nap. 380 V	20,2 A
sprawność	88,5%
współczynnik mocy	0,85
ponaďte z katalogu odczytano:	

$$\frac{I_1}{I_2} = 5,2 \quad \frac{N_1}{N_2} = 1,8 \quad \frac{M_1}{M_2} = 2$$

3.1. Wyniki pomiarów i analiza przydatności sygnału od zmian prędkości obrotowej silnika napędzającego mieszadło w procesie mieszania

Metoda ta była zaproponowana w publikacjach [1, 2]. Pomiar prędkości obrotowej zrealizowano w układzie jak na rys. 2. Na wale silnika umiesz-



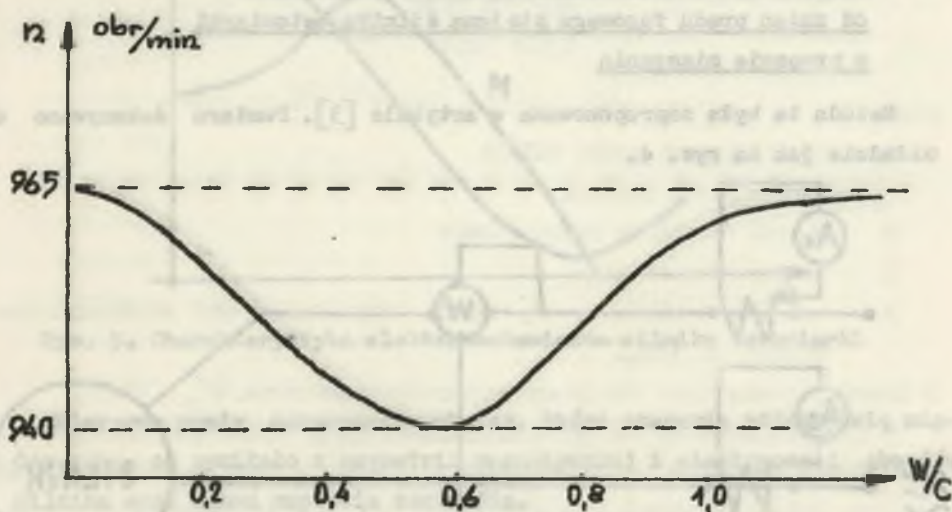
Rys. 2. Schemat układu pomiaru prędkości obrotowej mieszadła betoniarki

1 - silnik betoniarki, 2 - tarcza z 60 otworami, 3 - przystawka tranzystorowa z fotodiodą, 4 - częstotliciomierz cyfrowy, 5 - betoniarka

czono tarczę, na obwodzie której znajduje się 60 otworów, dzięki czemu odczytu dokonywano bezpośrednio w obrotach na minutę. Jako przetwornik prędkości obrotowej na impulsy elektryczne zastosowano układ fotodiodowo-tranzystorowy. W celu dokładnego zaobserwowania małych zmian prędkości obrotowej silnika jako licznik impulsów zastosowano częstotliciomierz cyfrowy.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów zaobserwowano następującą zależność (rys. 3):

- gdy dozowano składniki stałe masy betonowej obroty były rzędu 965 obr/min, w miarę dozowania wody malały do 940 obr/min, aby potem w miarę wzrostu zawartości wody wzrosnąć do około 965 obr/min.



Rys. 3. Zależność prędkości obrotowej mieszadła od nawodnienia masy betonowej

W serii badanych tych samych próbek obroty silnika ulegały znacznym wahaniom w czasie pomiarów, zwłaszcza jeżeli w hali, w której wykonywano pomiary, włączano inne odbiorniki mocy. Przeprowadzono analizę wpływu zmian napięcia zasilającego i częstotliwości na zmianę prędkości obrotowej silnika zastosowanego w badanej betoniarce. W wyniku tego stwierdzono, że:

- gdy $U_{zas} = U_N \pm 10\%$ przy $f = \text{const}$ $M_N = \text{const}$, to $n = n_N \pm 1\%$
- gdy $f = f_N \pm 4\%$ przy $U_{zas} = \text{const}$ $M_N = \text{const}$, to $n = n_N \pm 4\%$.

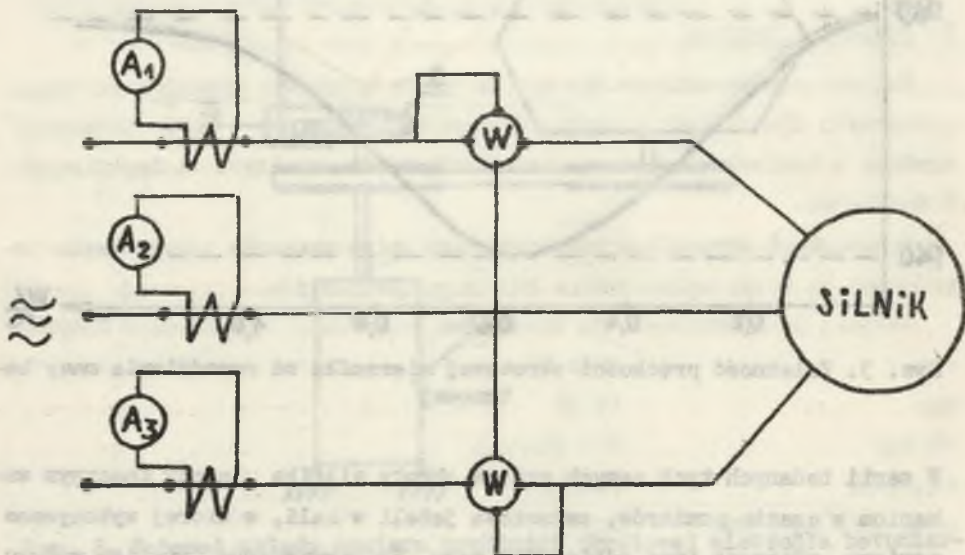
Wynika stąd, że zmiany częstotliwości w sieci zasilającej powodują zmianę prędkości obrotowej wału silnika rzędu pomierzonych zmian prędkości silnika będących wynikiem zmian oporów mieszanej masy betonowej.

Po stwierdzeniu tych zależności zaniechano dalszego pomiaru prędkości obrotowej silnika ponieważ, aby prędkość obrotowa odzwierciedlała

rzeczywiste zmiany oporu mieszania, należałoby stabilizować sieć, co w warunkach przemysłowych jest nieopłacalne.

3.2. Wyniki pomiarów i analiza przydatności sygnału od zmian prądu fazowego stojana silnika betoniarki w procesie mieszania

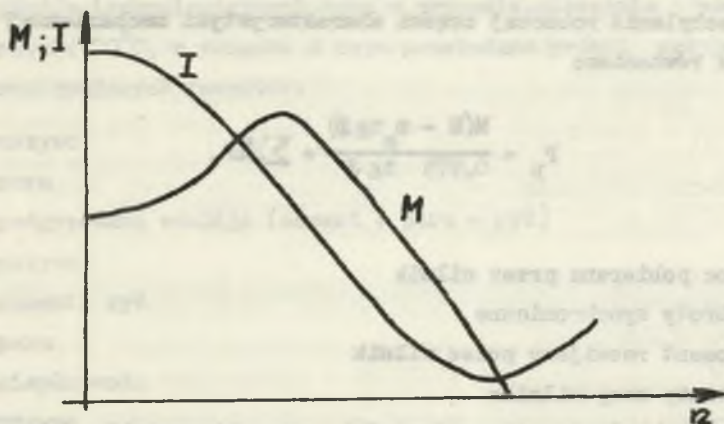
Metoda ta była zaproponowana w artykule [3]. Pomiaru dokonywano w układzie jak na rys. 4.



Rys. 4. Układ pomiaru prądu fazowego stojana silnika i mocy czynnej pobieranej przez silnik betoniarki

Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 9, 10, 11. W metodzie tej wykorzystuje się analogię pomiędzy przebiegiem prądu fazowego stojana silnika w funkcji jego prędkości obrotowej a przebiegiem momentu mechanicznego, które w zakresie pracy stabilnej silnika pokrywają się (rys. 5).

Z rysunku tego wynika, że zmiany prądu fazowego stojana silnika są miarą zmian momentu obciążenia, pochodzącego od zmian mieszania masy betonowej uwarunkowanego reologicznymi właściwościami masy.



Rys. 5. Charakterystyka elektromechaniczna silnika betoniarci

Mierzono prądy poszczególnych faz, które znacznie różniły się między sobą, co wynikało z asymetrii magnetycznej i elektrycznej obwodów silnika oraz wahań napięcia zasilania.

Na podstawie wykreślonych przebiegów prądów fazowych (I_1 , I_2 , I_3) oraz prądu średniego fazowego będącego średnią arytmetyczną poszczególnych prądów zasilających ($I_{sr} = I_1 + I_2 + I_3 \cdot \frac{1}{3}$) widać, że przebiegi te posiadają podwójne maksima, co najprawdopodobniej jest wynikiem niestabilności napięcia zasilania oraz niestabilności warunków pomiaru. Ten niejednoznaczny przebieg poszczególnych prądów fazowych oraz średniego prądu fazowego stojana silnika, wyklucza wykorzystanie tego sygnału do realizacji układu automatycznego sterowania konsystencji betonu w procesie mieszania.

3.3. Wyniki pomiarów i analiza przydatności sygnału od zmian mocy czynnej pobieranej przez silnik betoniarci w procesie mieszania

Trzeci sposób określenia zmian właściwości reologicznych masy betonowej w procesie mieszania w oparciu o sygnał elektryczny został zaproponowany przez Nasz zespół. Wykorzystana została zależność pomiędzy mierzoną mocą czynną pobieraną przez silnik a momentem obciążenia silnika, gdy silnik pracuje na prostoliniowej części charakterystyki e-

lektromechanicznej. Moc pobierana przez silnik może być przy przyjęciu stałego nachylenia roboczej części charakterystyki mechanicznej silnika opisana równaniem:

$$P_p = \frac{M(M - n_s \operatorname{tg} \varphi)}{0,975 \operatorname{tg} \varphi} + \sum \Delta P, \quad (1)$$

gdzie

P_p - moc pobierana przez silnik

n_s - obroty synchroniczne

M - moment rozwijany przez silnik

P - straty mocy silnika

φ - kąt nachylenia roboczej części charakterystyki elektromechanicznej silnika.

Z danych katalogowych odczytano sprawność znamionową $\eta_N = 88,5\%$

W czasie produkcji betonu silnik napędzający betoniarkę pracuje przy obciążeniu mniejszym niż znamionowe, w związku z czym można spodziewać się, że sprawność będzie wynosiła około 80%. W zakresie zmian obciążenia silnika, wynikających z oporów mieszania masy betonowej, udział procentowy strat mocy ($\sum \Delta P$) maleje ze wzrostem obciążenia w kierunku znamionowego, czyli można uważać na podstawie wzoru (1), że moc czynna pobierana przez silnik jest analogiem zmian oporów mieszania masy betonowej. Poświadczeniem tej tezy są wyniki pomiarów wykonanych w układzie jak na rys. 4 i przedstawionych wykreślnie na rys. 9, 10, 11.

W celu dokładnego rozeznania procesu technologicznego mieszania masy, przeprowadzono następujące pomiary:

- 1 - pobór mocy czynnej przez silnik betoniarki w funkcji w/c,
- 2 - pobór mocy czynnej przez silnik betoniarki przy danym w/c dla kolejnych okresów czasowych,
- 3 - pobór mocy czynnej przez silnik betoniarki przy powolnym i szybkim ciągłym dozowaniu wody,
- 4 - pobór mocy czynnej przez silnik betoniarki przy porcjowanym dozowaniu wody, dla próbek na bazie granitu i agloporytu o różnym stopniu zawilgocenia.

Ze względów technologicznych masa w procesie mieszania powinna mieć temperaturę 70°C , w związku z czym przebadano próbki przygotowane według następujących receptur:

1. kruszywo
+ para
+ podgrzewana emulsja (cement + para + pył)
2. kruszywo
+ cement, pył
+ para
+ ciepła woda
3. kruszywo
+ para
+ cement, pył
+ ciepła woda
4. kruszywo
+ cement, pył
+ zimna woda

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono dla wszystkich zdjętych przebiegów występowanie maksimum poboru mocy, przy czym nie dla wszystkich przebiegów krzywa posiadała wyraźny ostry wierzchołek.

W zasadzie wartość ekstremum pobieranej mocy dla każdej próbki posiadała inną wartość, co wynikało między innymi z różnego składu wagowego próbek oraz niezbyt dokładnego oczyszczenia betoniarki z poprzedniego zarobu.

W trakcie wykonywania badań używano watomierzy elektrodynamicznych. Wychylenia wskazówek watomierzy w procesie pomiarowym ulegały silnym wahaniom. Niemniej należy zauważyć, że tak dolne jak i górne pomierzone wartości miały przebieg ekstremalny.

Badając próbki o składnikach silnie zawilgoconych (zawartość wody 16-20% wagi kruszywa) podgrzewanych parą lub emulsją, maksimum poboru mocy wystąpiła po zadozowaniu bardzo małych ilości wody (3-5 l) w odróżnieniu od próbek niezawilgoconych (około 25 l wody). Niemniej po szacunkowym wyznaczeniu zawartości wody w kruszywie zawilgoconym oraz

dostarczonej w trakcie podgrzewania pary stwierdzono występowania maksimum oporów mieszania przy tym samym stosunku w/c.

Przebiegi mocy w relacji czasowej wykazały, że opory mieszania masy betonowej ustalają się w ciągu kilku sekund od chwili zaprzestania dozowania wody i praktycznie w przedziale kilku minut nie ulegają zmianie, czyli o właściwościach reologicznych masy betonowej w trakcie mieszania decyduje przede wszystkim ilość zadozowanej wody.

4. Koncepcja układu automatycznego sterowania konsystencji masy w procesie mieszania

W wyniku przeprowadzonych pomiarów i analiz można stwierdzić, że spośród trzech proponowanych metod najbardziej przydatną do zastosowania w układzie automatycznego sterowania konsystencji betonu w procesie mieszania, jest metoda wykorzystująca sygnał od zmian mocy czynnej pobieranej przez silnik betoniarki. Przebieg mocy pobieranej z sieci zasilającej w funkcji zawartości wody w mieszanej masie betonowej ma bowiem najbardziej wyraźny charakter ekstremalny.

Zamiast stosowanych dotychczas w układzie pomiarowym dwu watomierzy elektrodynamicznych, proponuje się zastosowanie przetworników mocy czynnej prądu przemiennego trójfazowego typu PP3-1 produkcji Lubuskich Zakładów Aparatów Elektrycznych "Lumel", które służą do ciągłego przetwarzania mocy czynnej prądu przemiennego trójfazowego trój- lub czteroprzewodowego na proporcjonalną wartość natężenia prądu stałego.

Wykorzystując powtarzającą się prawidłowość występowania maksimum oporów masy betonowej w procesie mieszania dla stałej wartości stosunku w/c na obecnym etapie rozeznania procesów przebiegających w układzie mieszania masy betonowej można zaproponować następujący sposób sterowania procesem mieszania:

- 1 - zadozowanie stałych składników masy betonowej,
- 2 - wstępne podgrzanie parą przegrzaną tak, aby ilość wody zawartej w parze i składnikach stałych masy betonowej nie spowodowała przekroczenia ekstremalnej wartości oporów mieszania, zanim masa betonowa nie osiągnie wymaganej temperatury określonej procesem technologicznym,

- 3 - wykrycie maksimum oporów mieszania w trakcie powolnego dozowania wody,
- 4 - zadozowanie określonej ilości wody zgodnej z wymogami technologii "PRAS-BET".

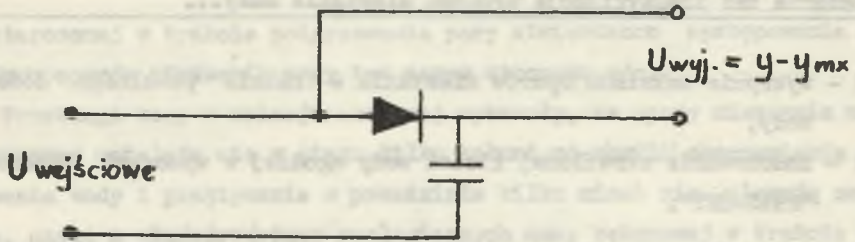
W ten sposób otrzymujemy masę betonową o stałej określonej wymaganiami zawartości wody, z uwzględnieniem wstępnego zawilgoenia składników betonu.

Schemat blokowy układu automatycznego sterowania konsystencji masy betonowej w procesie mieszania, według programu podanego powyżej przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Schemat blokowy układu automatycznego sterowania konsystencji masy betonowej

Na obecnym etapie rozeznania przebiegów procesu mieszania masy betonowej, jako układ wykrywania ekstremum pobranej mocy czynnej przez silnik, można zaproponować układ oparty na zapamiętywaniu ekstremum. Schemat ideowy takiego układu przedstawiony jest na rys. 7. Układ ten realizuje funkcję zapamiętywania ekstremalnego sygnału wejściowego z równoczesnym porównaniem sygnału wejściowego i wyjściowego. Na wyjściu

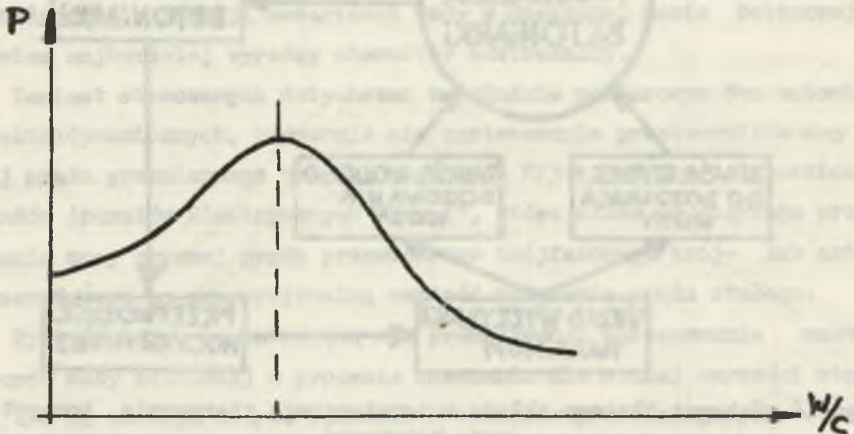


Rys. 7. Schemat układu śledzenia ekstremum

układu sygnał jest w każdej chwili równy różnicy wartości sygnału bieżącego i maksymalnego [4, 5, 6].

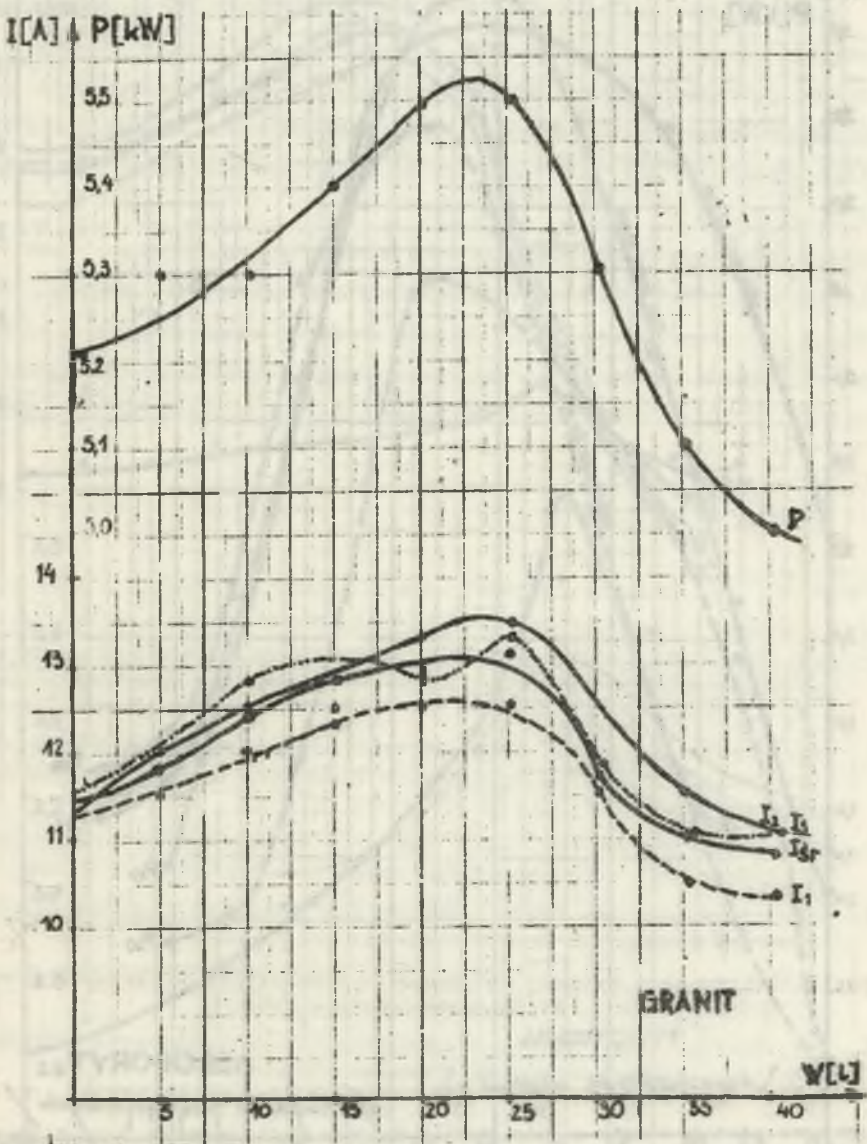
5. Wnioski

Przeprowadzone pomiary i badania potwierdziły przewidywane (na podstawie literatury) przebiegi oporów mieszania masy betonowej w funkcji w/c .

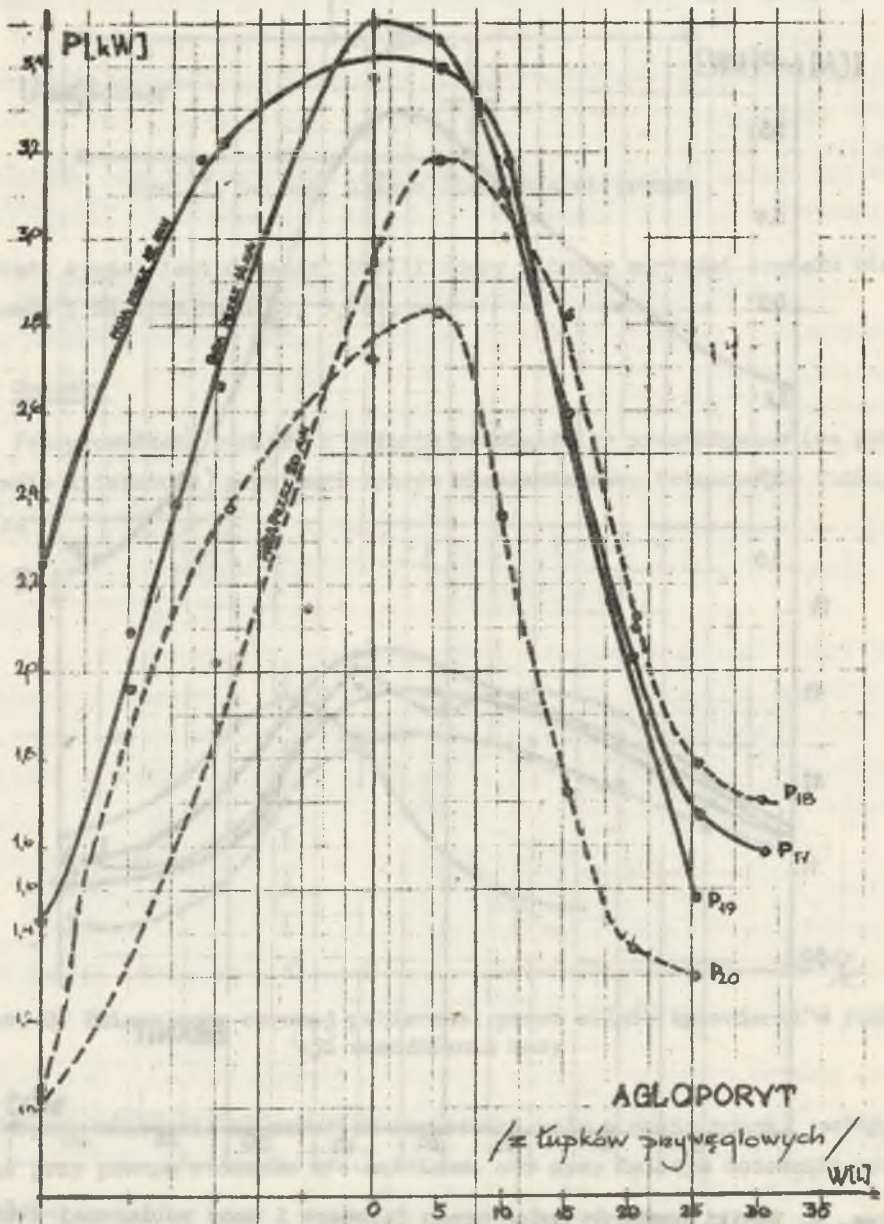


Rys. 8. Zmiany mocy czynnej pobieranej przez silnik betoniarki w funkcji nawodnienia masy

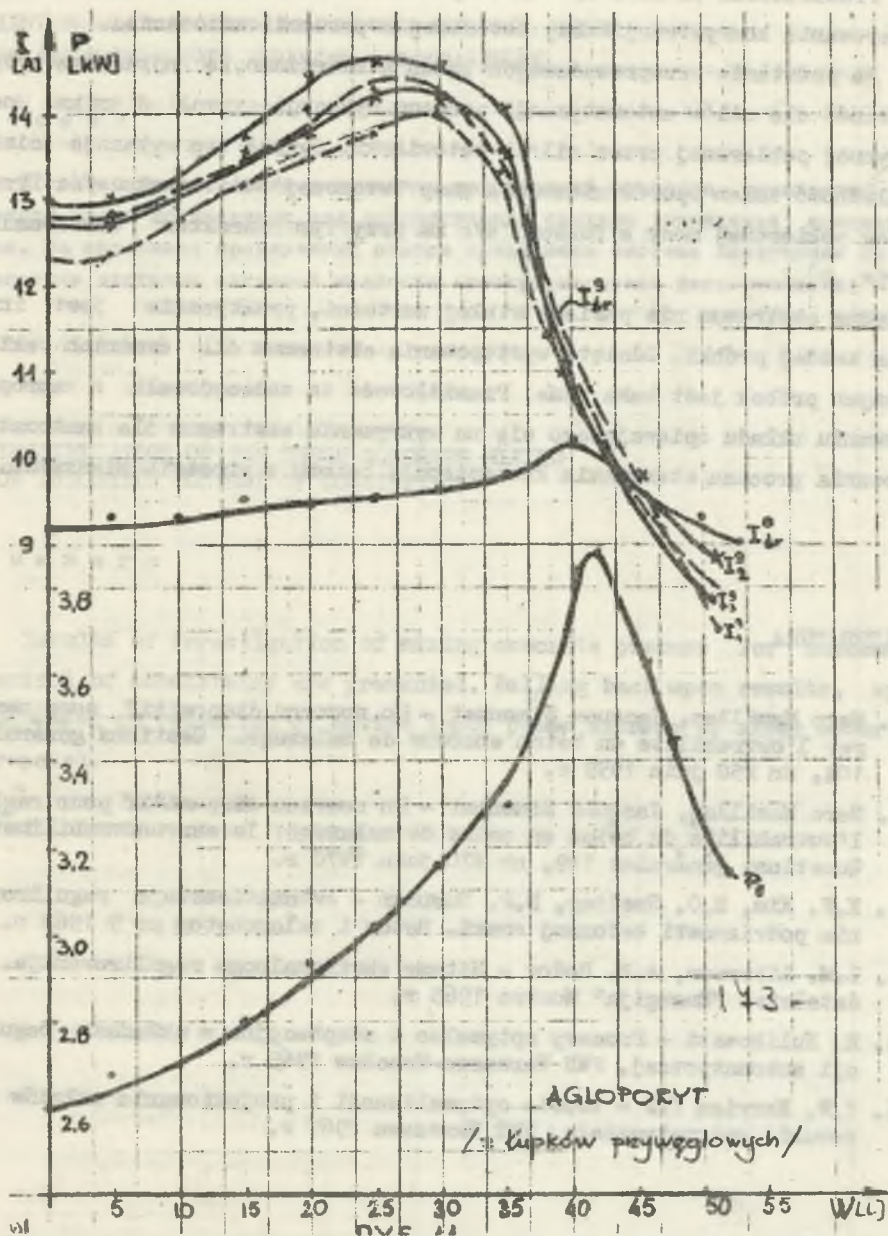
Opory mieszania ze wzrostem zawartości wody w masie rosną, osiągając przy pewnym stosunku w/c maksimum, aby przy dalszym dozowaniu wody maleć.



Rys. 9. Wyniki pomiarów zmian prądu fazowego i mocy pobieranej w trakcie dozowania wody do mieszalnika betoniarki dla mas na kruszywach żupkoporytowym i granitowym



Rys. 10. Wyniki pomiarów zmian prądu fazowego i mocy pobieranej w trakcie dozowania wody do mieszalnika betoniarki dla mas na kruszywach żupkoporytowych i granitowym



Rys. 11. Wyniki pomiarów zmian prądu fazowego i mocy pobieranej w trakcie dozowania wody do mieszalnika betoniarki dla mas na kruszywach kłupkorytowym i granitowym

Prawidłowość ta może być wykorzystana do zautomatyzowania układu sterowania konsystencji masy betonowej w procesie mieszania.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że największą przydatność dla celów automatyzacji procesu wykazuje sygnał od zmian mocy czynnej pobieranej przez silnik betoniarki. Sygnał ten wykazuje ścisłą zależność zmian oporów mieszania masy betonowej od stosunku w/c. Przebieg pobieranej mocy w funkcji w/c ma przy tym charakter ekstremalny (rys. 8).

Rzędna ekstremum nie posiada stałej wartości, praktycznie jest inna dla każdej próbki. Odcięta występowania ekstremum dla średnich takich samych próbek jest taka sama. Prawidłowość ta zadecydowała o zaproponowaniu układu opierającego się na wykrywaniu ekstremum dla zautomatyzowania procesu sterowania konsystencji betonu w procesie mieszania.

LITERATURA

1. Marc Mamillan, Jacques Simonnet - Un nouveau dispositif pour mesurer l'ouvrabilité du béton en cours de malaxage. Questions générales 104, nr 258 juin 1959 r.
2. Marc Mamillan, Jacques Simonnet - Un nouveau dispositif pour régler l'ouvrabilité du béton en cours de malaxage: le servouvrabilimetre Questions générales 109, nr 270 juin 1970 r.
3. K.N. Kim, E.O. Smelter, N.P. Turndar - Avtomaticeskoje regulirovanie podviznosti betonnoj smesi. Beton i zelazobeton nr 9 1962 r.
4. L.M. Liberzon, A.B. Rodov - Sitemy ekstremalnogo regulirovanija. Izdatelstvo "Energija" Moskva 1965 r.
5. R. Kulikowski - Procesy optymalne i adaptacyjne w układach regulacji automatycznej. PWN Warszawa-Wrocław 1965 r.
6. C.W. Merriam III - Teoria optymalizacji i projektowania układów sterowania automatycznego. WNT Warszawa 1967 r.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ
ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОНСИСТЕНЦИЕЙ

Резюме

В статье представлено результаты исследований процесса смешивания бетонной смеси необходимых для автоматизации система управления консистенции. На основании проведенных опытов предложена система полагающая на наблюдении экстрема активной мощности электродвигателя бетономешалки.

IDENTIFICATION OF THE FRESH CONCRETE MIXING
FOR AUTOMATIC CONTROL OF CONSISTENCE

Summary

Results of investigation of mixing concrete process for automatic control of consistency are presented. Falling back upon results, system based on dedection of active input power extreme of mixer motor is proposed.