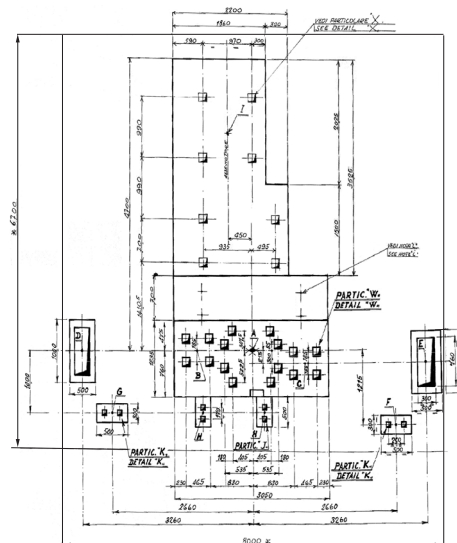


## 6. STAN AWARYJNY FUNDAMENTU BLOKOWEGO POD KOMPRESOR

### 1. WPROWADZENIE

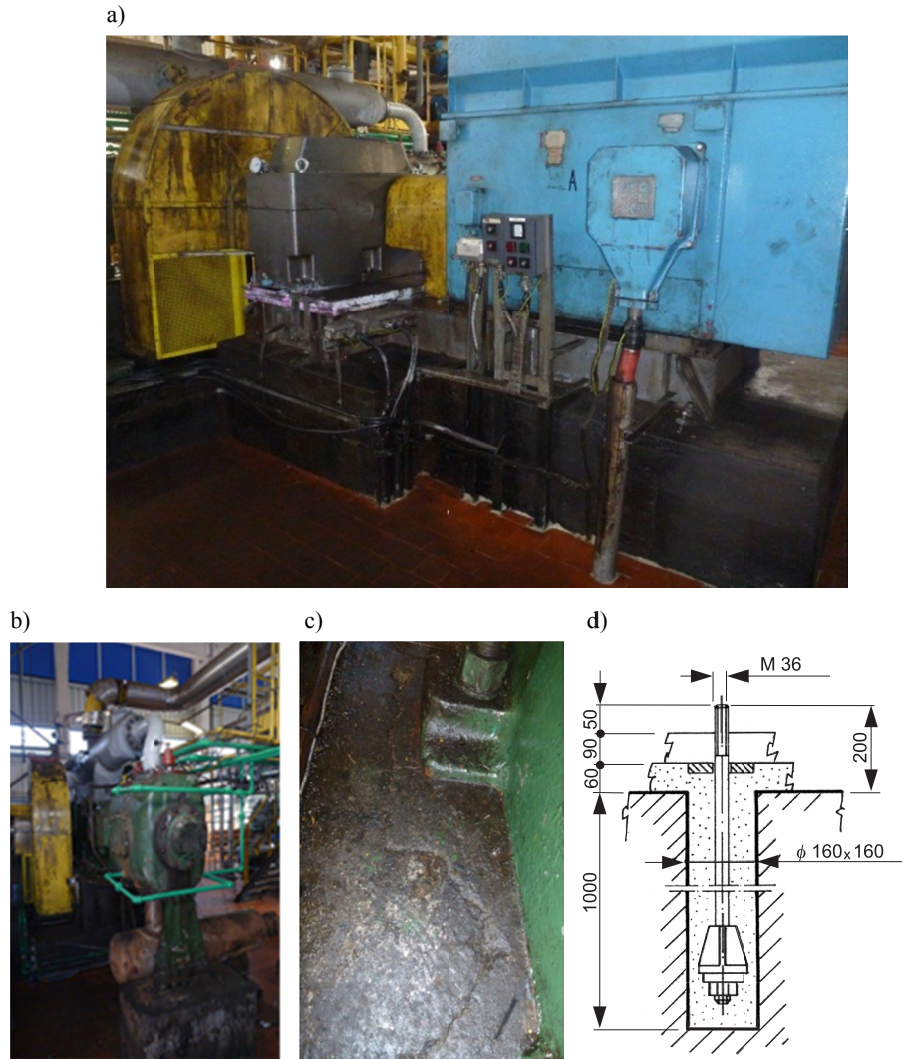
Czynnikami decydującymi o stanie technicznym obiektu budowlanego są: jakość dokumentacji projektowej, sposób realizacji oraz eksploatacji. W znakomitej większości przypadków, w praktyce niezależnie od rodzaju elementu budowlanego błędy projektowe oraz wykonawcze mają zdecydowanie największy wpływ na bezpieczeństwo konstrukcji, jak również bezpieczeństwo użytkowania. Jednak bardzo często niewłaściwa eksploatacja, w szczególności brak prowadzenia okresowych remontów oraz brak wykonania remontu kapitalnego, przyczyniają się do rozszerzenia usterek powodujących powstawanie istotnych uciążliwości eksploatacyjnych. Sytuacja ta dotyczy między innymi zakładów przemysłowych, w których elementy żelbetowe stanowią konstrukcje wsporcze pod urządzenia technologiczne, a część uszkodzeń tych elementów jest identyfikowana właśnie podczas prac remontowych i naprawczych aparatury oraz urządzeń tych (rys. 1). Usuwanie uszkodzeń w zakładach przemysłowych, w których odbywa się produkcja w systemie ciągłym, jest dodatkowo utrudnione ze względu na bardzo częsty brak możliwości lub ograniczenia czasowe, co do wyłączenia urządzeń technologicznych z użytkowania, gdyż najczęściej stanowią one element ciągów produkcyjnych.



Rys. 1. Rzut górnej powierzchni fundamentu blokowego pod kompresor (rysunek na podstawie archiwalnej dokumentacji projektowej) (X – punkty pomiarowe podczas badań dynamicznych)

Fig. 1. Throw of an upper surface of the block foundation up to the compressor (picture based on the archival project documentation) (X – measuring points during dynamic tests)

Celem artykułu jest przedstawienie uszkodzeń fundamentu blokowego pod kompresor, które zostały zauważone podczas przygotowania do jego okresowych prac remontowych (rys. 2). W artykule zamieszczono analizę wpływu uszkodzeń na bezpieczeństwo dalszego użytkowania zarówno fundamentu, jak i kompresora oraz przedstawiono rozwiązanie usunięcia występujących uszkodzeń fundamentu blokowego (tab. 1, rys. 3, 4).



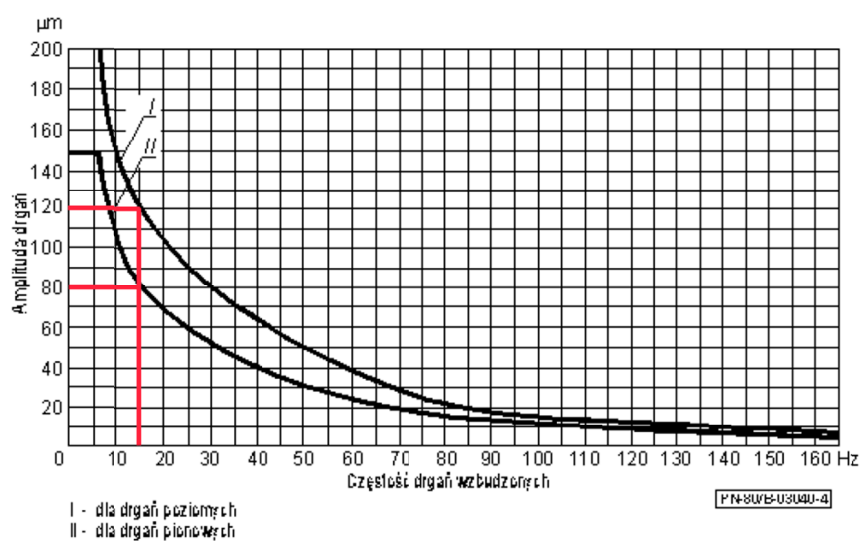
Rys. 2. Fundament blokowy pod kompresor: a), b) widok, c) zarysowanie w miejscu osadzenia śruby kotwiącej, d) rozwiązanie projektowe zakotwienia w miejscu uszkodzenia (rysunek na podstawie archiwalnej dokumentacji projektowej)

Fig. 2. Block foundation up to the compressor: a), b) view, c) outlining stopping at the settling of the anchor screw, d) design solution of the settling at the site of damage (picture based on the archival project documentation)

Tabela 1. Zestawienie wyników: badania dynamiczne i obliczenia (metoda analityczna oraz MES)  
 Table 1. Comparing results: dynamic tests and calculations (analytical method and of FEM – Finite Element Method)

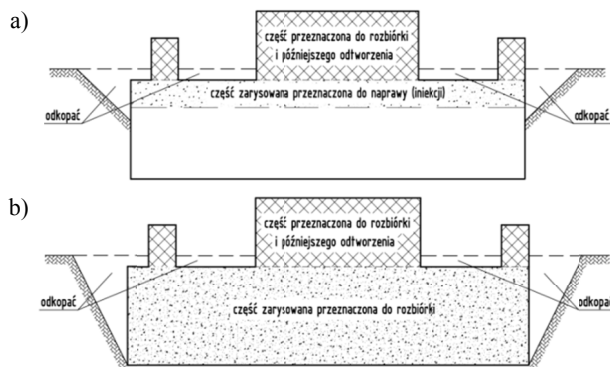
Postać drgań	Częstość [Hz]		
	Badania	Obliczenia	
		analityczna	MES
Postać 1	13,75*	8,56	9,52
Postać 2		10,95	9,99
Postać 3		14,25	13,28
Postać 4		15,17	15,34
Postać 5		19,52	18,48
Postać 6		-	18,97
Postać 7		-	75,65
Postać 8		-	82,79
Postać 9		-	92,06
Postać 10		-	94,18
Postać 11		-	107,83

(\*) – pomierzona w trakcie badań dominująca częstość drgań układu fundament-maszyny – dominating frequency of examinations of pulses of the arrangement foundation-devices measured during tests



Rys. 3. Wykres dopuszczalnych amplitud drgań wymuszonych ze względu na użytkowanie maszyny według [13]

Fig. 3. Graph of acceptable vibration amplitudes extorted on account of using the machine according to [13]



Rys. 4. Schemat prac naprawczych fundamentu blokowego pod kompresor dla przypadku: a) WARIANTU I, b) WARIANTU II zakresu prac

Fig. 4. Outline of repair works of the block foundation up to the compressor for the case: a) of the VARIANT I, b) of the VARIANT II of the scope of works

## 2. DANE OGÓLNE

Fundament blokowy zrealizowany został na podstawie indywidualnie opracowanej dokumentacji projektowej. Składał się z bloku fundamentowego (zagłębionego poniżej poziomu posadzki) oraz cokołów fundamentowych (wyprowadzonych ponad poziom posadzki). W rzucie poziomym fundament zbliżony był kształtem do litery T o wymiarach 740 cm (szerokość części szerszej), 340 cm (szerokość części węższej) oraz całkowitej długości 620 cm (rys. 1, rys. 2a, b). Wysokość bloku fundamentowego wynosiła 180 cm, wysokość najwyższego z cokołów 125 cm, a całkowita wysokość fundamentu 305 cm. Dokumentacja projektowa przewidywała zastosowanie do realizacji fundamentu betonu klasy  $R_w = 170$  atm. zbrojonego stalą klasy A-0 znaku St0S. Na cokołach fundamentowych posadowiony był kompresor (składający się z silnika, skrzyni biegów, sprzęgła oraz komory sprężania). Ciężar poszczególnych części kompresora wynosił odpowiednio 5025 kg, 630 kg, 472 kg oraz 12800 kg. Elementy kompresora przymocowane były do konstrukcji fundamentu przy pomocy śrub kotwiących M36, osadzonych w gniazdach wykonanych w cokołach.

W czasie przestoju kompresora, spowodowanego prowadzeniem okresowych prac remontowych, stwierdzono zarysowanie gniazda jednej ze śrub kotwiących i obłuzowanie tej śruby oraz zarysowanie górnej powierzchni jednego z cokołów fundamentowych.

## 3. OPIS USZKODZEŃ FUNDAMENTU BLOKOWEGO

W czasie oględzin nie stwierdzono głębokich ubytków (wykruszeń) betonu wzdłuż widocznego zarysowania na wierzchu cokołu. Rysa w obszarze gniazda śruby kotwiącej miała maksymalną szerokość rozwarcia równą 0,5 mm (rys. 2c). Nie zaobserwowano lokalnego rozwarstwienia betonu, zarówno na wysokości, jak również w obszarze rzutu cokołów fundamentowych. Na bocznych płaszczyznach cokołów fundamentowych nie stwierdzono występowania widocznych uszkodzeń w postaci zarysowań, należy jednak dodać, że powierzchnia cokołów była intensywnie zabrudzona (zaolejona). Z tego względu ostateczne oględziny powierzchni cokołów zaplanowano po wyłączeniu kompresora z użytkowania i oczyszczeniu cokołów.

#### 4. ANALIZA STANU TECHNICZNEGO FUNDAMENTU BLOKOWEGO

Fundament blokowy pod kompresor posadowiony był bezpośrednio na gruncie (warstwie piasków drobnych), których parametry obliczeniowe statyczne przyjęto do obliczeń na podstawie zaleceń normy [14], natomiast parametry dynamiczne według normy [13]. Rodzaj gruntu, poziom wody gruntowej oraz stopień zagęszczenia przyjęto na podstawie archiwalnych badań gruntowych. Parametry obliczeniowe statyczne betonu przyjęto zgodnie z zaleceniami normy [15], natomiast parametry dynamiczne betonu zgodnie z zaleceniami zamieszczonymi w [1].

Do obliczeń sprawdzających przyjęto następujące założenia: a) ciężar poszczególnych elementów kompresora przyłożony został do górnej powierzchni fundamentu, w środku ciężkości rzutu każdego z elementów na górną płaszczyznę fundamentu, b) ciężar wimika przyjęto równy 50% masy kompresora z uwagi na brak danych dotyczących jego rzeczywistego ciężaru, c) pominięto sprawdzenie nośności śrub oraz ich zakotwienia z uwagi na brak danych dotyczących wartości momentu wywołanego zwarcie kompresora, d) sztywność podłoża obliczona metodą analityczną po iteracyjnym dopasowaniu, wykorzystana została do obliczeń numerycznych MES, skalowanie wykonane zostało z dopasowaniem częstości, jak również postaci drgań, e) w obliczeniach pominięto wpływ tłumienia.

Częstość drgań własnych (pionowych) układu fundament – maszyny (kompresor), obliczona metodą analityczną wg zaleceń normy [13] wynosiła 15,17 Hz. Przyjęto, że jest to wartość odniesienia do wyznaczenia (skalowania) stałych sprężystych gruntu do obliczeń metodą MES. Dopasowanie polegało na iteracyjnym skalowaniu stałych sprężystych gruntu do takich wartości, dla których najniższa częstość drgań pionowych będzie zbliżona do wartości obliczonej analitycznie 15,17 Hz. Przyjęto kryterium zgodności częstości oraz postaci drgań. Najbardziej istotne wyniki zawiera tabela 1.

Na podstawie wykonanych pomiarów ustalono, że dominująca częstość drgań układu fundamenty-maszyny wynosiła 13,75 Hz. Obliczona metodą analityczną częstość drgań pionowych (15,17 Hz) była  $\approx 10\%$  wyższa od wartości pomierzonej w trakcie badań (pomiar *in situ*). Pozwoliło to na sformułowanie tezy, że fundament pracował w stanie rezonansu ( $13,75 \times 1,1 \approx 15,13$  Hz).

Obliczenia numeryczne MES pozwoliły na wyznaczenie pierwszych 20 częstości i odpowiadających im postaci drgań własnych układu fundament-maszyny.

Obliczone dwiema metodami (analityczną oraz z zastosowaniem MES) amplitudy drgań układu fundament-maszyny również były zbliżone do wartości pomierzonych w trakcie badań. Pomierzone zostały również amplitudy przyspieszeń układu fundament-maszyny w wybranych miejscach oraz maksymalna wartość amplitudy przyspieszeń, która pozwoliła na szacunkowe obliczenie amplitudy drgań fundamentu. Maksymalna pomierzona wartość przyspieszenia w kierunku pionowym wynosiła  $10,56 \text{ m/s}^2$ . Amplituda drgań wynosiła:

$$\lambda_{bad} = 2 \times \pi \times \omega_{bad} = 2 \times \pi \times 13,75 = 86,3938 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (1)$$

$$p = -\lambda^2 A_x \sin \lambda t \Rightarrow A_x = -\frac{p}{\lambda^2 \sin \lambda t} \quad (2)$$

$$A_x = -\frac{p}{\lambda^2 \sin \lambda t} = -\frac{10,56}{86,3938^2 \times \sin(86,3938)} = 0,00142 = 1,42 \text{ mm} \quad (3)$$

Maksymalna wartość amplitudy pionowej drgań fundamentu z uwzględnieniem współczynnika dynamicznego, obliczona metodą analityczną, wynosiła 1,52 mm, a metodą MES – 1,36 mm. Uzyskano dobrą zgodność wyników obliczeń z badaniami. Wartości te były jednak większe od wartości granicznych podanych w normie [13],  $A_{max} = 1,52 \text{ mm} > A_{dop} = 80 \text{ }\mu\text{m}$  z uwagi na użytkowanie kompresora.

Maksymalne naprężenia w gruncie pod podstawą fundamentu, wywołane obciążeniami statycznymi, wynosiły 62,3 kPa i były mniejsze od nośności gruntu (wartości granicznej) równej 1990 kPa.

W wykonanych odkrywkach fundamentu (odwiertach rdzeniowych, zarówno pionowych, jak również poziomych) stwierdzono brak przyczepności prętów zbrojenia do betonu. Pręty były zaolejone i powierzchniowo skorodowane. Brak było widocznej korozji wżerowej na powierzchni wyciętych prętów. Głębokość zaolejonej warstwy przypowierzchniowej betonu, pomierzona w pobranych rdzeniach, wynosiła od 2,5 do 8,0 cm.

Powierzchnia betonu w obszarze śrub kotwiących była bardzo intensywnie zaolejona, a olej zbierał się w miejscach zagłębień, rys i ubytków betonu. W trakcie pracy kompresora olej wypływał z rysy w miejscu zakotwienia śruby, co świadczyło o braku przyczepności między powierzchnią fundamentu w kanale i cementowym wypełnieniem tego kanału.

Głębokość zaolejenia kanałów oraz wielkość strefy bez przyczepności była trudna do oszacowania. Tym samym należało założyć, że zakotwienie śrub w fundamencie było nieskuteczne i wymagało naprawy. Określona na podstawie udostępnionej dokumentacji archiwalnej długość zakotwienia śrub (~1000 mm) była zbyt mała. Wobec zakresu uszkodzeń należało rozważyć konieczność dodatkowego zakotwienia wszystkich śrub w dolnej części fundamentu na głębokość min. 500 mm poniżej poziomu wyprowadzenia cokołów i zmianę sposobu kotwienia z tarcowego na rozporowy.

Jednocześnie przekroczone były normowe, według [13], warunki *Stanu Granicznego Użytkowania* z uwagi na dopuszczalne amplitudy drgań maszyny. W celu likwidacji ponadnormatywnych amplitud drgań oraz zmiany charakterystyki dynamicznej układu fundament-maszyna zalecono, po naprawie fundamentu, zastosowanie podkładek wibroizolacyjnych w miejscach oparcia elementów kompresora na fundamencie blokowym. Zadaniem podkładek będzie zmiana charakterystyki dynamicznej sił wymuszających, przekazywanych na przedmiotowy fundament.

## 5. ROZWIĄZANIE PROJEKTOWE NAPRAWY FUNDAMENTU BŁOKOWEGO

Uwzględniając aktualny stan techniczny fundamentu blokowego zaproponowany został następujący sposób jego naprawy [1÷12]: a) demontaż kompresora wraz z silnikiem i przekładniami, b) mechaniczne oczyszczenie powierzchni cokołu fundamentu z luźnych fragmentów betonu, farby oraz pozostałych zabrudzeń, c) usunięcie warstwy posadzki oraz gruntu pod posadzką do głębokości  $\approx 50$  cm poniżej poziomu wierzchu odsadzki fundamentu, d) mechaniczne oczyszczenie odkrytych powierzchni fundamentu, e) dalsze działania naprawcze według rozwiązań WARIANTOWYCH.

WARIANT I (przypadek braku istotnych uszkodzeń dolnej części fundamentu) obejmował: a) rozbiórkę cokołów fundamentu blokowego do poziomu dolnej odsadzki fundamentu (rys. 4a), b) uzupełnienie drobnoziarnistą zaprawą cementową (odporną na obciążenia dynamiczne) miejsc ubytków betonu na górnej powierzchni odsadzki cokołu, c) reprofiliację górnej powierzchni odsadzki, d) na górnej powierzchni odsadzki fundamentu blokowego w jego dolnej części wykonanie otworów (w formie przewiertów) pod

śruby kotwiące. Średnicę śrub należało dobrać do wielkości występujących sił (po określeniu wartości momentu zwarcia) Zalecono zastosowanie śrub fundamentowych typu rozporowego o długości zakotwienia min. 1500 mm. Lokalizację śrub należało dopasować do rozstawu istniejących otworów (istniejących śrub kotwiących), e) zabezpieczenie metodą iniekcji istniejących zarysowań bloku fundamentowego z zastosowaniem żywicy duramerowej na bazie epoksydu, przy czym iniekcje zaolejonych rys należało poprzedzić próbą ich odtuszczenia poprzez płukanie środkiem wysokoalkalicznym, f) odtworzenie rozebranych cokołów fundamentu blokowego z zastosowaniem betonu klasy C25/30, g) w miejscach oparcia kompresora na fundamencie pozostawienie wnęki/zagłębienia na zamontowanie wibroizolatorów, np. elastomerowych, h) zabezpieczenie odkrytych w trakcie remontu powierzchni zagłębionych w gruncie oraz wyprowadzonych ponad posadzkę powierzchni cokołów elastyczną, wysokoodporną chemicznie szpachlówką poliuretanową, i) zasypanie odkrytych części fundamentu i odtworzenie posadzki z zastosowaniem kątowej taśmy dylatacyjnej boków cokołu, aby uniknąć przenoszenia drgań na styku fundamentu z posadzką, j) montaż podkładek wibroizolacyjnych, k) montaż kompresora i jego rozruch, l) przeprowadzenie badania skuteczności wibroizolacji.

WARIANT II (przypadek stwierdzenia zarysowania i pęknięcia dolnej części fundamentu) obejmował: a) wykonanie całkowitej rozbiórki fundamentu blokowego do poziomu jego posadowienia oraz jego b) odtworzenie, c) zabezpieczenie bocznych powierzchni bloku fundamentowego, bocznych oraz górnych powierzchni cokołu fundamentu, realizacji dylatacji obwodowej bloku fundamentowego oraz zastosowanie podkładek wibroizolacyjnych, jak w przypadku rozwiązań przyjętych dla WARIANTU I.

## 6. WNIOSKI

Na górnej powierzchni fundamentu blokowego, w miejscu osadzenia jednej ze śrub kotwiących stwierdzono lokalne zarysowanie betonu wypełnione olejem oraz poluzowanie śruby kotwiącej. Uszkodzenie zaobserwowano podczas prowadzenia prac remontowych kompresora. Przyczyną uszkodzenia zakotwienia była utrata przyczepności zaprawy cementowej, wypełniającej kanał kotwiący na styku z betonem, będąca następstwem dynamicznych obciążeń wywołanych pracą kompresora. Rysa na przestrzeni czasu wypełniła się olejem.

Wyniki pomiarów oraz obliczeń sprawdzających pokazały, że fundament blokowy pracował w stanie rezonansu, pomierzone oraz obliczone amplitudy drgań pionowych przekraczały wartości graniczne zalecane w normie. Naprężenia w gruncie wywołane ciężarem fundamentu oraz kompresora były niższe od granicznych wartości normowych.

Opracowano projekt remontu fundamentu kompresora w dwóch wariantach. Wybór odpowiedniego wariantu naprawy uzależniony był od zakresu uszkodzeń stwierdzonych po wyłączeniu kompresora z użytkowania, odkopaniu i oczyszczeniu jego powierzchni oraz ocenie występujących uszkodzeń.

## LITERATURA

- [1] Lipiński J., 1985. Fundamenty pod maszyny. Arkady Warszawa.
- [2] Kral L., 1973. Elementy budownictwa przemysłowego. Tom II. Budowle specjalne. PWN Warszawa.

- [3] Meller M., Nowakowski M., 1994. Kominy przemysłowe i fundamenty pod maszyny. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej.
- [4] Włodarczyk W., Kowalski A., Pietrzak K., 1995. Projektowanie wybranych konstrukcji przemysłowych. Przykłady. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [5] Ściślewski Z., 1999. Ochrona konstrukcji żelbetowych. Arkady Warszawa.
- [6] Czarnecki L., Emmons P.H., 2001. Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Polski Cement Warszawa.
- [7] Stypuła K., 2001. Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkiego i ich wpływu na budynki, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej 72.
- [8] Kawecki J., Stypuła J., 2013. Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływania komunikacyjne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- [9] Ruchała P., 2007. Identyfikacja parametrów zredukowanego modelu fundamentu pod turbozespół przy zastosowaniu funkcji falkowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska.
- [10] Chmielewska B., Koper J., 2006. Naprawa rys w konstrukcjach żelbetowych metodą iniekcji. XXI Ogólnopolska Konferencja Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 55-78.
- [11] Chmielewska B., Koper J., 2014. Naprawa rys w konstrukcjach żelbetowych metodą iniekcji. XXIX Ogólnopolska Konferencja Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 94-118.
- [12] Stypuła K., Koziół K., 2014. Zagadnienia wpływów dynamicznych w naprawach i remontach. XXIX Ogólnopolska Konferencja Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 60-74.
- [13] PN-B-03040:1980 Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny. Obliczenia i projektowanie.
- [14] PN-B-03020:1981 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. obliczenia statyczne i projektowanie.
- [15] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [16] PN-EN 1504-5:2013 Wyroby i systemy do ochrony i naprawy konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności – Część 5: Iniekcja betonu.
- [17] PN-EN 1504-9:2010 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności – Część 9: Ogólne zasady dotyczące stosowania wyrobów i systemów.

## EMERGENCY STATE OF THE BLOCK BASIS UP TO THE COMPRESSOR

*Summary.* In the paper a description of damage to the block foundation up to the compressor situated on the area of an industrial plant was presented. During preparations for periodic conservation works of the device damage to the structure of the foundation on which it was discovered bed, in particular covering it with drawings in part above the floor and starting fixing screws. Based on conducted analysis of the technical condition of the block foundation a design solution of his repair was suggested.