

Schabowska, Krystyna

Metodyka obliczeń przekładni zębatych w świetle dzieł Stanisława Solkiego (1622-1701)

Analecta 12/1-2(23-24), 235-251

2003

Artykuł umieszczony jest w kolekcji cyfrowej Bazhum, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych tworzonej przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego.

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie ze środków specjalnych MNiSW dzięki Wydziałowi Historycznemu Uniwersytetu Warszawskiego.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.



Krystyna Schabowska
Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
Lublin

METODYKA OBLICZEŃ PRZEKŁADNI ZĘBATYCH W ŚWIECIE DZIEŁ STANISŁAWA SOLSKIEGO (1622–1701)

1. Wstęp

Projektowanie i konstruowanie wszelkiego rodzaju urządzeń mechanicznych jest procesem twórczym. Od początku swej działalności krąg ludzi zajmujący się tym, nazwanych na pewnym etapie rozwoju techniki inżynierami¹, musiał na miarę swoich czasów utrwalać efekty własnej pracy. Oprócz materialnie istniejących egzemplarzy, starano się je zapisać w sposób umożliwiający odtworzenie, czyli istniała potrzeba stworzenia pewnego rodzaju dokumentacji technicznej.

Pierwszym, najistotniejszym dla technika problemem było zapisanie konstrukcji z natury rzeczy trójwymiarowej w sposób dwuwymiarowy, czyli na płaszczyźnie. Pewną próbę określenia tego zapisu spotkać można już u Witruwiusza, była ona jednak odnośna głównie do projektowania w dziedzinie architektury². Następnym problemem było podanie sposobu takiego doboru elementów tworzących konstrukcję, który gwarantował dobrą, zgodną z założeniami eksploatację. To zagadnienie jest już bardziej złożone technicznie, gdyż wymaga znajomości nauk podstawowych.

W dawnym polskim piśmiennictwie technicznym, pierwszym autorem który tak ujął zagadnienie konstrukcji mechanicznych, był Stanisław Solski.

2. Stanisław Solski i jego dzieła³

Stanisław Solski urodził się w 1622 roku w Kaliszu, w rodzinie mieszczańskiej. Mając 16 lat, po ukończeniu szkół w Kaliszu, wstąpił do zakonu jezuitów w Krakowie. W wieku 19 lat rozpoczął studia obejmujące filozofię, retorykę oraz teologię w Kaliszu, a także w Poznaniu. W następnych latach wykładał w szkołach jezuickich w Kaliszu, Krośnie, Poznaniu i Lwowie. Od 1654 do 1660 roku przebywał w Turcji, gdzie udał się wraz z poselstwem kasztelana Bieganowskiego. Opanował wówczas język turecki, co ułatwiło mu kontakty. W tym okresie dał się poznać jako matematyk, geometra m. in. wyznaczając wysokość obelisku na podstawie jego cienia na ziemi, co opisał potem w swym dziele *Architekt polski*.

Z tego okresu datowało się jego niezwykle zainteresowanie techniczne – budowa perpetuum mobile.

Po powrocie z Turcji S. Solski zamieszkał początkowo w Kaliszu, a następnie we Lwowie, zaś od 1666 roku związał się z dworem hetmana Sobieskiego jako kapelan obozowy.

W latach 1671–1683 zajmował stanowisko *prefectus fabricae* przy kolegium jezuickim i kościele Św. Piotra w Krakowie. Funkcja miała charakter administracyjny, obejmowała ogólny zarząd nad pracami budowlanymi oraz wszelkimi inwestycjami⁴. Okres ten odegrał w życiu S. Solskiego znaczącą rolę. Doświadczenie, które wtedy zdobył, w sposób istotny przełożyło się na poziom jego dzieł.

Od 1683 roku przebywał na dworze króla Jana III jako matematyk, geometra, a nawet powiernik królewski, przyjaźniąc się z przebywającym tam również A. Kochańskim⁵.

Ostatnie lata życia S. Solskiego upłynęły w ubóstwie, chorobie. Zmarł w Krakowie w 1701 roku.

Pierwszą – mającą swe ugruntowane miejsce w dziejach polskiej nauki – obszerną książką S. Solskiego o treści technicznej jest *Geometra polski*⁶. Praca ta ukazała się w trzech tomach kolejno w latach 1683, 1684 i 1686. Jak autor zaznacza w przedmowie, trzy ważne powody, które skłoniły go do napisania dzieła: „Naprzód: niedostatek ksiąg i instrumentów matematycznych. Po wtóre: żeby dobrze nie schodziło na księgach, siła ich przeczytać musisz, nim w nich do używania snadnego znajdziesz” i dalej: „Po trzecie: że słowa i terminy greckie i łacińskie, trudnią wyrozumienie tej nauki, dziwnie potrzebnej wszelkiej kondycji ludziom. Wziąłem przedsię ułatwienie tych przeszkód w *Geometrze* moim, w którym *praxes* abo używanie geometrii, znajdziesz polskim językiem porządnie rozłożone na pewne części zabawami nazwane”. Księga I liczy 288 stron, zawiera zabawy od I do VI, podzielone na części. Księga II liczy 152 strony – zabawy od VII do XI, zaś księga III licząca 169 stron zawiera zabawy od XII do XIV. Dalsze strony zawierają suplementy do poszczególnych rozdziałów,

zauważone przez autora omyłki, jak również przestrogi dla czytelników oraz wskazówki dla ewentualnych wydawców. Jako doskonały praktyk, S. Solski podjął się trudnego zadania napisania pracy zawierającej nie tylko wiadomości podstawowe z geometrii, ale również zastosowanie ich w praktyce. Szczególnie cenna jest księga II zawierająca opis ówczesnych instrumentów mierniczych – w tym pomysłu autora – jak też podająca sposoby pomiarów. Zaletą podręcznika jest również to, że napisany został w języku polskim. Ułatwieniem dla czytelników było zamieszczenie w początkowej części I zabawy słownika „Terminy geometrii albo zebranie słów geometrycznych, częścią z łacińskiego i z greckiego języka na polski przeformowanych, częścią polskich wprowadzie ale nie zwyczajnych”.

W 1688 roku w Krakowie ukazała się następna praca S. Solskiego dotycząca geodezji *Praxis nova et expeditissima geometricae mansurandi distantias, altitudines et profunditates*⁷.

Jednak najcenniejszym dziełem w dorobku S. Solskiego jest *Architekt polski*⁸. Praca ukazała się w 1690 roku w drukarni Mikołaja Aleksandra Schedla, nakład dzieła nie jest znany, do dzisiejszych czasów ocalały cztery egzemplarze. Pierwodruk liczy 200 stron oraz 245 rysunków, przy czym tylko jeden wykonany został metodą miedziorytu, reszta metodą drzeworytu. Doceniając rolę starannego, właściwie wykonanego rysunku czyli zapisu konstrukcji w zagadnieniach techniki, sam autor tak to komentuje „Choćbym też chciał dla nich [czytelników – przyp. autorki] co drukować obszerniej, tego bez figur drogich nie pojmy, których zem z lepszych czasów nie miał gotowych, a teraz drukując nie znajduję, za co ich dać rznąć”⁹.

Księga pierwsza zawiera trzy zabawy.

Zabawa I *Okolo zmniejszania i ulżenia ciężarów przy ich przeprowadzaniu z miejsca na miejsce, wciąganiu do góry i spuszczeniu na dół i o piętnastu instrumentach albo machinach ulżywających ciężary, z ich używaniem* zawiera podstawowe pojęcia i definicje techniczne oraz opis i funkcjonowanie wybranych przyrządów do podnoszenia i przemieszczania ciężarów.

Zabawa II *O machinach prędkich, które prędkością przyczyniają ciężkości, jakie są: młyny wodne, bydłce, wietrzne, piły wodne, kołowroty kuchenne, zegary itp.* zawiera w swej początkowej treści bardzo cenne z punktu widzenia rozwoju polskiej myśli technicznej rozdziały (nazwane przez autora naukami), dotyczące metodyki doboru kół zębatych stosowanych w przekładniach zębatych. Omówienie tego fragmentu dzieła jest celem niniejszej publikacji.

Zabawa III *O wodzie* dotyczy zagadnień z hydromechaniki. Interesujące są zwłaszcza różnego rodzaju urządzenia jak budzik wodny, fontanny czy naczynie dozujące wodę po włożeniu monety.

Porównując treść dzieła z tytułem zauważa się, że S. Solski planował napisanie dalszych części. Jednak w zakończeniu *Architekta polskiego*, autor pisze:

„Wiele opuszczam własności używania wody i doświadczenia sekretów wodnych, służących do szukania nieustannego biegu dla wielkiego kosztu, którego jeżeli Pan Bóg nie opatrzy, mniej więcej czasu zostanie na gotowanie się do szczęśliwej śmierci. Ty, czytelniku, przyjmiesz z rąk Opatrzności Boskiej, że ani wtórej, ani trzeciej księgi *Architekta* nie oglądasz”¹⁰. Księgi te nie ukazały się w druku, nie wiadomo również czy istniały w rękopisie. W 1959 r. staraniem Zakładu Historii Nauki i Techniki Polskiej Akademii Nauk wydany został *Architekt polski* jako II tom *Źródło do Dziejów Nauki i Techniki*. Praca ta stanowi materiał źródłowy prezentowanego opracowania.

W swym dorobku pozostawił S. Solski również publikacje dotyczące jego zainteresowania konstrukcją perpetuum mobile. Pierwsza z nich *Machina motum perpetuum exhibens sine ullo aquae naturaliter decurrentis, absque ullo animali, absque sole, igne, vento, fumo, argento, vino, etc.* zawierająca rysunek maszyny oraz cztery strony objaśnień, ukazała się w Warszawie w 1661 roku. Druga praca dotycząca tej samej tematyki, stanowiąca poprawioną i rozszerzoną wersję pierwszej *Machina exhibendo motui perpetuo artificiali idonea. Mathematicis ad examinandum et perficiendum proposita*, ukazała się w Krakowie w 1663 roku¹².

3. Metodyka doboru kół zębatych wg S. Solskiego

Architekt polski S. Solskiego powszechnie uważany jest za dzieło z dziedziny mechaniki, hydrotechniki. Jednak praca ta, to również wspaniały przyczynek do rozwoju polskiej myśli technicznej w dyscyplinie podstaw konstrukcji maszyn, szczególnie obliczeń kół i przekładni zębatych.

S. Solski w swych dziełach, starał się poprzedzać zastosowania praktyczne oraz prezentowane konstrukcje mechaniczne wiadomościami teoretycznymi. Tak jest i w przypadku pracy *Architekt polski*. W zabawie II opis konstrukcji różnego rodzaju młynów oraz pił do drewna, poprzedził rozdziałami dotyczącymi metodyki doboru kół i przekładni zębatych stosowanych w tych urządzeniach. Zawarł to w części 1 *O początkach i własnościach należytych do kół, które w prędkie maszyny wchodzą* oraz części 2 *O rozstawianiu palców i zębów na kołach i kółkach małych*¹³.

Autor tak to uzasadnia: „W machinach wszelkich: we młynach, kieratach, zegarach, kołowrotach, dobre rozstawienie palców albo zębów na ich kołach tak jest potrzebne, że bez niego takowe koła godne są ognia. Dlatego że się muszą prędko psować, jeżeli będzie liczba palców kołowych niemożna i niesprawna” i dalej „Prości młynarze dębnią po kole cerkliną drewnianą, wbiwszy w końce gwoźdźki żelazne, póki im dobrze zleli podział nie wynidzie. Dlatego też dla swojej niewiadomości i czasu natrawią, i koła niedługo użyją, gdyż niedoskonałe rozmierzone palce i cewy, ustawicznie kalicząc koło, prędko je rozgruchocą”¹⁴.

3.1. Wykład słów niezwykłych i definicje

S. Solski, przewidując brak znajomości terminologii technicznej u przyszłych czytelników *Architekta*, wprowadził podstawowe pojęcia, wyjaśniając je¹⁵. Poniżej przytoczono ważniejsze, cytując autora.

I tak:

- „centrum koła znaczy śrzodek koła,
- dyjmeter koła jest szerokość albo wysokość, albo rozłożystość koła,
- obwód albo cyrkuł koła jest okrągłość koła, po której palce stoja,
- półdyjmeter jest połowa rozłożystości koła,
- cewy znaczą krąg mały albo kółko z wałeczkami, które młynarze cewkami zowią,
- palce w kołach są to kołki stojące na kole, zegarmistrze zowią je zębami,
- policzek koła jest płaskość zwierzchnia albo spodnia koła, na której zęby stoja ku górze albo ku ziemi,
- czoło koła jest sama okrągłość powierzchnia koła,
- miara palca na kole albo zęba na kółku małym jest miarą miąższości i wespół odległości jednego od drugiego palca albo zęba,
- modna liczba albo sprawna palców i zębów jest, kiedy koło wielkie tyle ma palców albo koło małe tyle zębów, że obróciwszy cewy albo tryby kilka, kilkanaście albo kilkadziesiąt razy, albo będąc obrócone od cewów albo trybów jeden raz zupełny, żadnego palca ani zęba nie zostawi, który by miał zachodzić na obrót cewów niezupełny”.

Określenia dyjmeter (średnica) czy półdyjmeter (promień) nie budzą wątpliwości dzisiejszego czytelnika. Inne wymagają jednak komentarza.

Np. policzek koła, to obecnie płaszczyzna czołowa, zaś czoło koła – powierzchnia boczna walca (koła), a miąższość zęba to nic innego jak jego grubość.

S. Solski zamiennie używa nazw zęby i palce, bez względu na ich położenie – na powierzchni bocznej walca (koła), bądź skierowane ku górze, na płaszczyźnie czołowej¹⁶ – ryc. 1.

3.2. Wymiary kół zębatych

W dalszej części prezentowanej pracy przedstawiono sposób obliczania kół zębatych zaproponowany przez S. Solskiego, odnosząc do stosowanego obecnie.

Na rys. 2. przedstawiono obecnie używane podstawowe wymiary w walcowym kole zębatym¹⁷.

W *Architekcie* używane jest określenie dyjmeter, czyli średnica, przy czym z tekstu wynika że nawiązując do dzisiejszej terminologii chodzi o średnicę dna wrębów. Grubość palca lub zęba g określana jest (jak już wspomniano) jako miąższość, szerokość wrębu s – jako odległość palców lub zębów od siebie, zaś podziałka nominalna t_0 – jako miara zęba.

Czyli:

$$(1) \quad t_0 = s + g = \text{miara zęba}$$

Przystępując do obliczeń, autor odwołuje się do księgi I, zabawy VI *Geometry* – własność CLXXXII –, gdzie przyjmuje podstawową do obliczeń zależność¹⁸:

$$(2) \quad \text{obwód} / \text{średnica} = 22 / 7$$

Jest to nic innego jak określenie liczby π przyjęte przez S. Solskiego.

Zadania rozwiązane przez autora dotyczą obliczenia wymiarów kół takich jak średnica czy miara zęba, ale też liczby zębów lub palców.

Pierwszym zagadnieniem z tej tematyki jakie rozwiązuje na kartach *Architekta* jest obliczenie średnicy koła zębatego: „Danej liczbie palców i odległości ich od siebie przybrać dyjament koła”¹⁹.

Przykład: mając daną liczbę zębów 240, odległość między zębami 1,5 cala, zaś przyjętą grubość palca bądź zęba 1 cal, obliczyć średnicę. Rozwiązując należy obliczyć obwód, będący iloczynem liczby zębów oraz miary zęba, czyli:

$$(3) \quad \text{obwód} = \text{liczba zębów} \times \text{miara zęba}$$

Stąd:

$$\text{obwód} = 240 (1 + 1,5) = 600 \text{ cali}$$

Korzystając z zależności (2) oblicza się średnicę:

$$600 / \text{średnica} = 22 / 7$$

Obliczona w ten sposób wartość średnicy wynosi $190^{20}/_{22}$ cala. Następnie autor daje uwagę: „Notuj: że wyrachowanego dyjamentu potrzeba umniejszyć 2 razy wziętą długością palców albo zębów, kiedy mają stać na czele koła”, czyli oblicza się średnicę dna wrębów – podstawową do stosowanej wówczas obróbki.

Poniżej przeprowadzono obliczenia tego przykładu, stosując współczesny nam sposób²⁰.

Przyjmując dzisiejsze oznaczenia, obliczyć można moduł m_o , pamiętając, że miara zęba przyjęta przez S. Solskiego równa jest współczesnej podziałce nominalnej t_o , czyli

$$t_o = 1 + 1,5 = 2,5$$

Stąd moduł nominalny m_o wynosi:

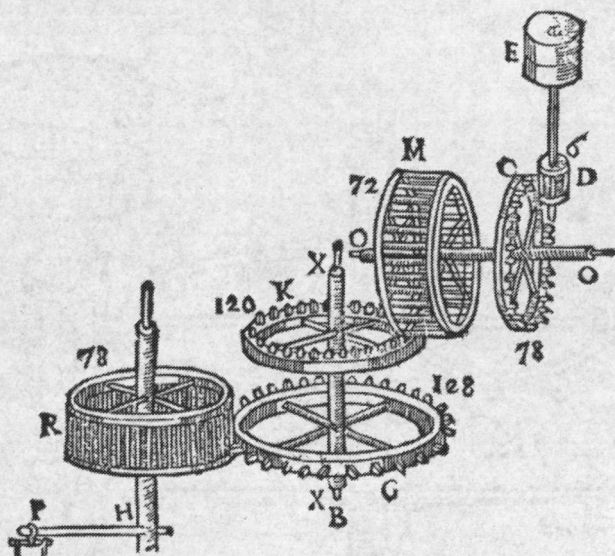
$$(4) \quad m_o = t_o / \pi = 0,796$$

Średnicę podziałową oblicza się:

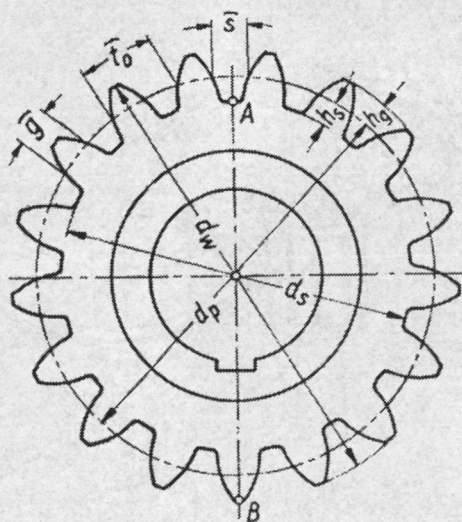
$$(5) \quad d_p = z m_o = 191 \text{ cala}$$

gdzie: z – liczba zębów

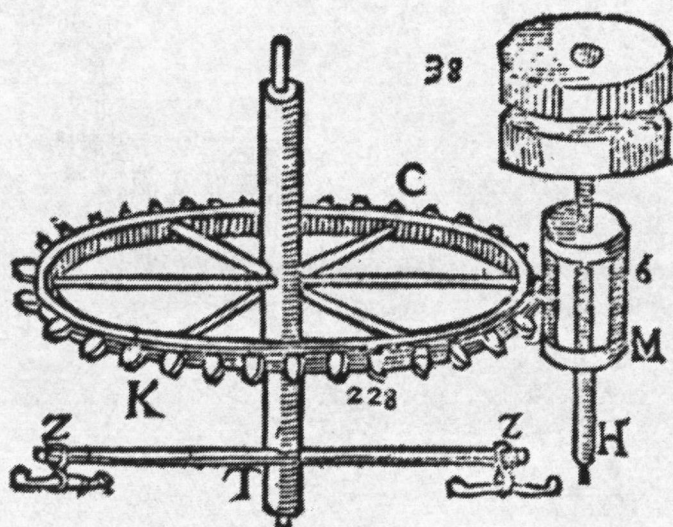
Oceniając z perspektywy czasu tok obliczeń zaproponowany przez S. Solskiego, należy uznać za wzorowy.



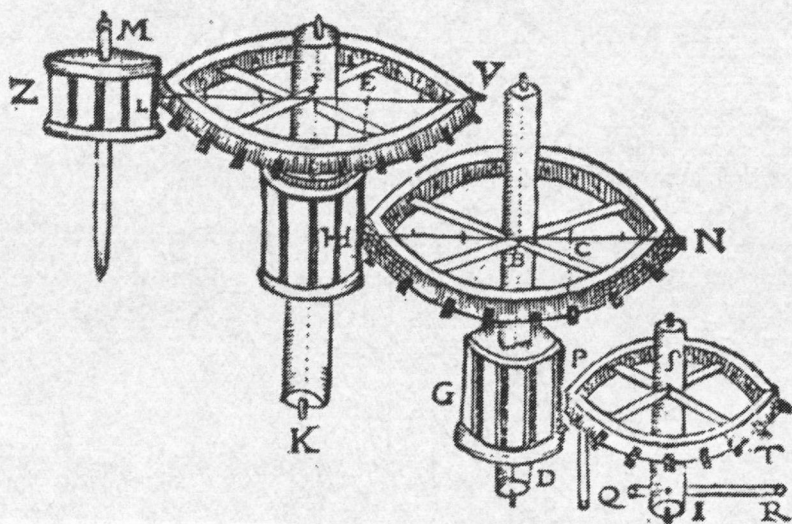
Ryc.1. Położenie zębów lub palców w kołach zębatych, na czole koła (na powierzchni bocznej walca) oraz na policzkach (na płaszczyźnie czołowej).



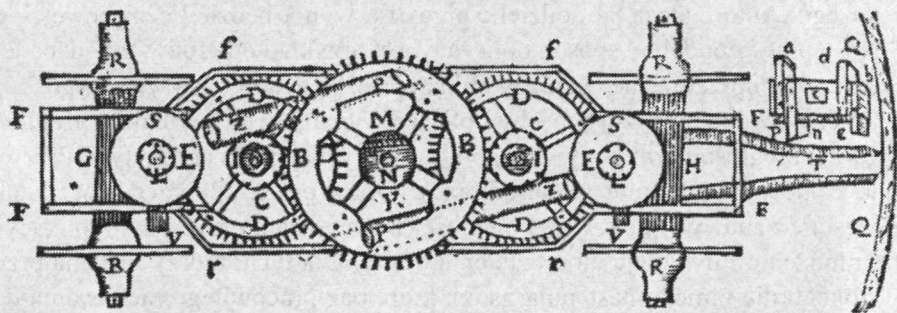
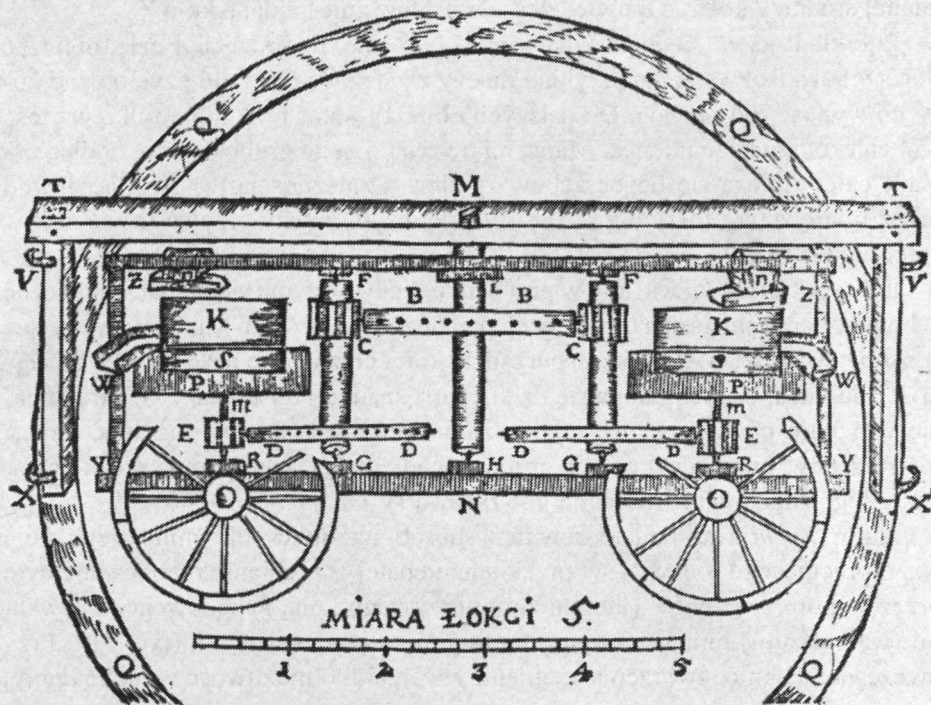
Ryc.2. Podstawowe wymiary w walcowym kole zębatym; d_p – średnica podziałowa, d_w – średnica wierzchołków, d_s – średnica dna wrębów, g – grubość zęba, s – szerokość wrębu, t_o – podziałka nominalna, h_g – wysokość głowy zęba, h_s – wysokość stopy zęba.



Ryc. 3. Przykład przekładni zastosowanej w młynie.



Ryc.4. Przykład odwzorowania przekładni zębatej.



Ryc.5. Młyn stosowany powszechnie w obozach wojskowych, montowany na wozie.

Korzystając z zależności (2) i (3) w pracy podano również sposób obliczania odległość zębów oraz ich grubości²¹.

Następnie S. Solski podaje sposób obliczenia liczby palców lub zębów dla znanej średnicy koła: „Opowiedzieć, ile palców zniesie dane koło”²².

Przykład: jeżeli średnica koła wynosi 240 cali, miara zęba 4 cale, obliczyć ilość zębów. Rozwiązując przykład należy z zależności (2) obliczyć obwód koła, co wynosi $754 \frac{2}{7}$ cala. Do dalszych obliczeń autor przyjmuje tylko wartość 754 cale, odrzucając ułamek. Mając miarę zęba tj. jego grubość wraz z odległością 4 cale, oblicza się liczbę zębów zgodnie z zależnością (3), dzieląc obwód przez miarę zęba i otrzymując $188 \frac{2}{4}$, przy czym należy przyjąć liczbę zębów całkowitą – 188.

Dalej S. Solski zaleca, aby w przypadku kiedy otrzyma się nieparzystą liczbę zębów, wziąć najbliższą parzystą, najlepiej podzieloną przez 6. Miało to związek ze sposobem, w jaki wykonawca sporządzał koło, co zawarte jest w nauce 8 części 2: „Jakim sposobem mogą się dzielić koła snadno i doskonale”. We fragmencie tym autor podaje sposób, w jaki dzielić średnicę koła, aby otrzymać żadaną liczbę zębów, przy założonej ich grubości i odległości. Jako pomoc przy rozwiązywaniu tego zagadnienia zalecona jest zabawa IV *Geometry*²³.

Autor *Architekta* podaje również sposób na obliczenie mniejszego koła współpracującego – cewy – w przekładni zębatej. Zazębienie realizowane było przez współpracę zębów (lub palców) pierwszego koła, napędowego, z cewkami (wałeczkami) umieszczonymi na drugim kole, napędzanym (ryc. 3)²⁴. Przy ówczesnej technice tworzenia uzębienia stwarzało to możliwość w miarę dobrej pracy zazębienia, przy jednakowej grubości zębów oraz cewek.

W rozwiązany przykładzie dane jest koło, które posiada 84 zęby. Należy dobrać do niego koło mniejsze – cewę, obliczając konieczną liczbę cewek, przy założeniu że koło mniejsze obróci się 14 razy przy jednym obrocie koła większego. Autor zaleca 84 podzielić przez 14, wynik będzie liczbą cewek – 6.

Następnie w podobny sposób obliczany jest przykład odwrotny, gdy dana jest liczba cewek i przełożenie, a należy obliczyć liczbę zębów koła większego²⁵.

Przedstawione powyżej sposoby obliczeń wymagały od czytelnika *Architekta* pewnej biegłości w wykonywaniu podstawowych działań arytmetyki. Przewidując kłopoty z tym, autor w dalszej części pracy pisze: „Poprzedzające nauki tej części 2 zabawy II potrzebują biegłości w rachowaniu przez mnożenie albo dzielenie liczby. Dla tych, którzy liczenia przez mnożenie nie umieją, następują nauki, które bez pracowitego rachowania danej liczbie palców albo zębów z tablice poprzedzającej podają i dyjаметer koła, które by mogło znieść liczbę daną palców, i cewy i danemu dyjаметrowi naznaczają przyzwoitą liczbę palców, i inne trudności ułatwiają”²⁶.

W celu ułatwienia i usprawnienia pracy rzemieślników trudniących się wykonywaniem kół zębatych, autor podjął trud opracowania tabeli:

„Tablica służąca na rozporządzenie palców i cewek do kół danych i na przybranie liczby palców i cewek zamierzonych”²⁷. Pozwalało to w łatwy sposób dobrać zarówno wymiary koła, liczbę zębów jak również dobrać koło współpracujące przekładni.

Poniżej podano fragment tabeli (tab.1).

Tabela 1. Wartości współczynników służących do doboru średnicy, promienia i ilości zębów koła zębatego oraz liczby cewek koła współpracującego.

Liczba cewek/ /liczba obrotów cewy						Liczba Palców	Dyjameter koła	Półdyjameter Koła
4	5	6	8	10	12			
1	0	0	0	0	0	4	1. 6	0. 14
0	2	0	0	1	0	10	3. 4	1. 13
5	4	0	0	2	0	20	6. 8	3. 4
0	10	0	0	5	0	50	15. 20	7. 21
25	20	0	0	10	0	100	31. 18	15. 20
27	0	18	0	0	9	108	34. 8	17. 4
0	30	25	0	15	0	150	47. 16	23. 19
44	0	0	22	0	0	176	56. 0	28. 0
50	40	0	25	20	0	200	63. 14	31. 18
56	0	0	28	0	0	224	71. 6	35. 14
72	0	48	36	0	24	288	91. 14	45. 18
75	60	50	0	30	25	300	95. 10	47. 16
0	70	0	0	35	0	350	111. 8	55. 15
100	80	0	50	40	0	400	127. 6	63. 14
0	82	0	0	41	0	410	130. 10	65. 5
105	84	70	0	42	35	420	133. 14	66. 18

Kolumny od pierwszej do szóstej zawierają liczbę cewek, kolumna siódma liczbę palców (zębów). Dzieląc liczbę palców przez liczbę cewek, otrzymano wartości wpisane w wiersze kolumn od pierwszej do szóstej. Podano tam ile razy obróci się cewa zawierająca wybraną liczbę cewek, przy założonej liczbie

zębów koła napędzającego, czyli określono przełożenie. Jeżeli nie jest to liczba całkowita, w tabeli pojawiają się wartości zerowe.

W kolumnie ósmej opisanej jako „Dyjameter koła” zawarto, nie jak można sądzić z opisu, wartość średnicy koła, ale współczynnik do jej obliczania, co będzie omówione na przykładzie. Podobnie w kolumnie dziewiątej zawarto współczynniki do obliczenia promienia. Zarówno w kolumnie ósmej jak i dziewiątej wpisano dwie liczby w każdym wierszu.

Tabela zawiera dane dla kół o liczbie zębów od 4 aż do 420.

Następnie autor podał bardzo czytelne wskazówki, w jaki sposób korzystać z tabeli, popierając je przykładami. Dostrzega się tu niezwykle zmysł praktyczny, którym odznaczał się S. Solski. Dla mniej wprawnych czytelników proponuje sposób wykreślny, zaś dla pojętniejszych – dokładniejszy, częściowo obliczeniowy.

Sposób korzystania z tabeli S. Solski wyjaśnia na konkretnych przykładach. Pierwszy z nich to dobór średnicy koła zębatego dla założonej liczby zębów: „Z tablice przybrać danej liczbie palców dyjameter koła”²⁸.

Przykład: mając założoną liczbę zębów 108, o grubości 1,5 cala, odległości 1,5 cala (czyli miara zęba wynosi 3 cale), korzystając z tabeli obliczyć średnicę koła. W celu rozwiązania odszukać należy w tabeli współczynnik średnicy odpowiadający założonej liczbie zębów. W danym przypadku jest to 34 i po kropce 8.

Proponowane rozwiązanie wykreślne polegało na odmierzeniu cyrklem jednej danej miary zęba – w rozpatrywanym przykładzie jest to 3 cale – a następnie odmierzeniu tej wielkości 34 razy na dowolnym pręcie. Dało to wartość średnicy 102 cale. Jeżeli jednak wykonawcy zależało na dokładniejszym obliczeniu, należało dodatkowo jedną miarę zęba podzielić na 22 części, wziąć z nich wymiar 8 części (druga liczba po kropce) i dodać do odmierzonej uprzednio na pręcie. W rozpatrywanym przykładzie jest to około 103 cale (102 + około 1). W ten łatwy sposób można było znaleźć wartość liczbową średnicy.

Metoda druga polegała na wykonaniu prostych obliczeń.

Po odnalezieniu w tabeli wartości współczynnika 34, 8 należało pomnożyć miarę zęba 3 cale przez współczynnik 34 otrzymując 102 cale. Następnie pomnożyć drugą z liczb 8 przez miarę zęba 3 cale otrzymując 24 oraz podzielić wynik przez 22 i dodać do poprzednio obliczonego. Otrzymuje się tę samą wartość jak w przypadku metody wykreślnej t.j. $102 + 24/22 = 103 \frac{2}{22}$ cala.

Poprawność powyższych obliczeń sprawdzono przy zastosowaniu zależności (4) i (5).

Stąd otrzymuje się:

$$d_p = z m_o = 108 \times 3/\pi = 103,1 \text{ cale}$$

W podobny sposób można przy pomocy tabeli łatwo obliczyć promień koła.

Przykład: jeżeli liczba zębów ma wynosić 288, miara zęba 4 cale, obliczyć promień. Rozwiązując należy odszukać w tabeli współczynnik odpowiadający tej liczbie zębów do obliczenia promienia. W danym przypadku jest to 45 i po kropce 18.

Dalej należy 45 pomnożyć przez miarę zęba 4 otrzymując 180 cali oraz 18 pomnożyć przez miarę zęba 4 i podzielić przez 22 otrzymując 3 cale.

Promień obliczony w tym przykładzie ma wartość $180 + 3 = 183$ cale.

Oczywiście tabela ta pozwala również na rozwiązanie zagadnienia odwrotne-go, to jest znalezienia liczby zębów dla założonej średnicy lub promienia koła²⁹.

Przedstawiona tabela służyła również do doboru kół w przekładniach zębatych³⁰.

Przykład: mając daną liczbę zębów 176, miarę zęba 4 cale oraz zakładając że na pełny obrót koła zębatego przypadną 22 obroty cewy, znaleźć konieczną liczbę cewek oraz średnicę koła zębatego. W tabeli, w wierszu gdzie znajduje się liczba zębów 176, odnaleźć należy liczbę obrotów cewy 22, która odpowiada liczbie 8 cewek. I dalej odnaleźć wskaźnik obliczania średnicy – 56, stąd średnica wynosi $56 \times 4 = 224$ cale.

Część dzieła poświęconą obliczaniu kół oraz przekładni zębatych S. Solski kończy nauką 17 w której omawia sposoby podziału koła zębatego na żadaną liczbę części „O wydzieleniu kół według liczby palców położonej w kolumnie siódmej tablicy poprzedzającej”³¹.

Podobnie jak w naukach poprzednich, autor zagadnienie to omawia rozwiązując przykład. I tak, zakładając żadaną liczbę zębów 224 i liczbę 4 cewek, należy z tabeli I odczytać odpowiadającą jej wartość 56 obrotów. Następnie należy koło podzielić na 4 części – w każdej z nich będzie 56 zębów. Dzieląc koło ponownie, każdą z 4 części na pół czyli na 8 części, w każdej z nich znajdzie się 28 zębów. Koło dzieli się tak kolejno, aż w każdej z 32 jego części znajdzie się 7 zębów, co już wykonawcy nie powinno, zdaniem autora, sprawiać kłopotów.

Podobnie w kończącej tę część *Architekta* nauce 18, S. Solski omawia podział kół w przypadkach trudniejszych, kiedy już przy pierwszym podziale koła na części, w każdej z nich otrzymuje się liczbę zębów nieparzystą „O wydzieleniu kół na liczbę palców, rozłożoną w kolumnie siódmej tablicy poprzedzającej, kiedy w kolumnie pierwszej i w trzeciej po pierwszym rozdzieleniu koła na części sześć albo na ćwierci cztery przypadnie liczba nieparzysta”.

3.3. Odwzorowanie graficzne przekładni zębatych w *Architekcie*

Istotnym elementem tworzenia dokumentacji technicznej urządzeń mechanicznych jest graficzny zapis konstrukcji. Jak już wspomniano powyżej, rzutowanie prostokątne stosowano od najdawniejszych czasów w rysunkach architektonicznych i budowlanych. W rysunkach konstrukcji mechanicznych stosowano powszechnie rysunek perspektywiczny. S. Solski urządzenia opisywane w *Architekcie* przedstawiał na rysunkach perspektywicznych (por. ryc. 1, ryc. 3), nie zawsze umiejętnie wykonanych – ryc. 4. Jak daje się zauważyć, pewną trudnością dla wykonawcy była transformacja okręgu.

Jednak wśród rysunków przekładni zębatach jest jeden zasługujący na szczególną uwagę. W części 3 swego dzieła opisał konstrukcje, w których zastosowano te przekładnie – różnego rodzaju młyny. Interesujący z punktu widzenia rozwoju myśli technicznej jest rysunek przedstawiający młyn montowany na wozie, stosowany w obozach wojskowych – rys.5³². Urządzenie przedstawiono w dwóch rzutach, co autor opisuje: „Sporządzenie tedy wozowego młyna będzie takowe, jakie pokazują 2 figury: jedna reprezentująca stojące wały kół, wysokość cewów i kamieni grubość, druga – dyjаметry albo rozłożystość wałów, kół, cewów i kamieni, które dla snadniejszego pojęcia szerzej opisuję”.

Oceniając rysunek z dzisiejszej perspektywy należy stwierdzić, że jest on poprawnie wykonany metodą rzutowania prostokątnego – europejską. W taki sposób wykonuje się rysunki obecnie, bazując na stworzonej przez Monge’a (1746–1818) metodzie. Trzeba jednak pamiętać, że rysunek ten powstał w XVII wieku.

Rysunek górny – rzut na rzutnię pionową to obecnie rzut główny A, zaś rysunek dolny to rzut na rzutnię poziomą, obecnie rzut z góry B.

Innym, niezmiernie istotnym elementem rysunku jest zamieszczona tam podziałka rysunkowa. Zamysł takiego właśnie odwzorowania dwuwymiarowego przekładni, przyjęcie rzutowania prostokątnego, jak również umieszczenie na rysunku podziałki pozwala docenić w autorze niezwykle uzdolnionego technika.

4. Podsumowanie

Dzieło S. Solskiego *Architekt polski* zajmuje szczególną pozycję w dawnym polskim piśmiennictwie technicznym. W niniejszym opracowaniu przedstawiono tylko niewielki fragment dotyczący kół zębatach. Oceniając ten materiał z perspektywy czasu należy podkreślić, że było to cenne, kompleksowe opracowanie tematyki. Zaproponowany przez autora tok obliczeń jest prawidłowy. S. Solski, rozwiązując w *Architekcie polskim* przykłady, odwoływał się często do *Geometrii polskiego*, bazując na zawartych tam wiadomościach, dotyczących zarówno określenia podstawowej dla obliczeń kół zębatach zależności t.j. stosunku obwodu koła do jego średnicy, jak również sposobu podziału koła. Opierając się na treściach zawartych w obu dziełach, czytelnik mógł zapoznać się z całością ówczesnej wiedzy na temat obliczania i doboru kół zębatach w przekładniach.

Na szczególne uznanie zasługuje opracowana przez autora tabela, pozwalająca w prosty i łatwy sposób dobrać koła zębatach przekładni. Tak więc rzemieślnicy parający się tworzeniem kół zębatach otrzymali już w XVII wieku cenny i bardzo pomocny im podręcznik. Układ treści, rozwiązane liczne przykłady, cenne praktyczne wskazówki sprawiają, że jest to wzorowe opracowanie na ten temat.

Osobnym interesującym zagadnieniem jest graficzne odwzorowanie konstrukcji mechanicznych w Architekcie polskim. Stanowi to jednak temat na oddzielne opracowanie³³.

PRZYPISY

- ¹ W. J. Affelt: *Dziedzictwo w budownictwie albo o obiektach budowlanych jako dobrach kultury ksiąg dziesięć*. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1999, s. 20–24. W polskim piśmiennictwie technicznym szczególnie zasługi w określeniu słowa inżynier ma Józef Naronowicz-Naroński (1610–1678). W swym dziele *Budownictwo wojenne* (rękopis z 1659 r.) rozdział 15 w części II autor zatytułował *Traktat jaki ma być inżynier i co jego za powinność umiejętności i jaka powaga* por. J. Naronowicz-Naroński: *Budownictwo wojenne*. Wyd. Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1957, s. 126–129 (opr. z rękopisu). Podkreślić należy, że Naroński określił również umiejętności inżyniera na potrzeby cywilne „...aby umiał budować różne machinacje, jako windy do dźwigania i ciągnięcia największych i najcięższych rzeczy, także akwedukty, przewody wód na górę, młyny wietrzne i wodne compendiosissime, aby i w najmniejszej wodzie wodne, a w najmniejszym wietrze wietrzne mliwa swoje miały”. Również S. Solski używa określenia inżynier w odniesieniu do działalności cywilnej „Na dźwiganie lżejsze wszelkich ciężarów, tak po ziemi z miejsca na miejsce, jako do góry i z góry, różne indzinijerowie wynaleźli instrumenta i machiny”, por. S. Solski: *Architekt polski*. Wyd. PAN, Wrocław 1959, s. 8.
- ² Witruwiusz proponuje trzy rzuty podstawowe do przedstawienia budowli: ichnografię – rysunek podstawy planowanej budowli, ortografię – pionowy obraz fasady, scenografię – ściany boczne. Por. Witruwiusz: *O architekturze ksiąg dziesięć*. Przekład K. Kumaniecki, wyd. Prószyński i S-ka, Warszawa 1999, s. 30. Rzuty te odpowiadają powszechnie stosowanym dziś rzutom: A – rzutowi głównemu, B – rzutowi z góry oraz C – rzutowi bocznemu. Architekci w swych konstrukcjach najczęściej z techników używali rzutów prostokątnych.
- ³ Por.: F. Kucharzewski: *Kiedy pojawili się technicy w Polsce i którymi z poprzedników naszych pochłubić się możemy?*. Odczyt wygłoszony na posiedzeniu technicznym Stowarzyszenia Techników w Warszawie d. 3 października 1913, s. 11–12, 38; B. Orłowski: *Solski Stanisław*. [w:] *Słownik polskich pionierów techniki*. Wyd. Śląsk, Katowice 1984, s.194; J. Burszta, Cz. Łuczak: *Wstęp*. W: S. Solski: *Architekt...*, s.V–XXXII.
- ⁴ Funkcja *prefectus fabricae*, mająca w zasadzie charakter administracyjny, w przypadku S. Solskiego miała szerszy charakter. Pełnił on również funkcję głównego architekta swego zgromadzenia w Krakowie. Pod jego kierunkiem rozbudowano wówczas kolegium jezuickie oraz przeprowadzono prace budowlane w kościele Św. Piotra. Zdobyte wówczas doświadczenie w dziedzinie budownictwa pozwoliło S. Solskiemu na swobodne poruszanie się w zagadnieniach praktycznych w swych dziełach, tamże s. XXIII.
- ⁵ Adam (podpisujący się niekiedy Adamandus) Kochański (1631–1700) był jednym z najwybitniejszych przedstawicieli nauki swych czasów. W latach 1680–1696 pełnił funkcję preceptora syna królewskiego, a następnie bibliotekarza na dworze Jana III Sobieskiego. Matematyk, fizyk, mechanik korespondował z czołowymi uczonymi epoki (m.in. Leibnizem, Heweliuszem). Wiedza i osobowość A. Kochańskiego miały bez wątpienia wpływ na działalność naukową S. Solskiego. Obu uczonych łączyło również zainteresowanie konstrukcją perpetuum mobile. Por. B. Orłowski: *Kochański Adam*. [w:] *Słownik...*, s.100; T. Nowak: *Kochański Adam*. [w:] *Inżynierowie polscy w XIX i XX wieku*. Wyd. Retro-Art., Warszawa 2001, s.108–111; T. Bieńkowski, J. Dobrzycki: *Staropolski świat nauki*. Wyd. Retro-Art., Warszawa 1998, s. 54–62.

- ⁶ S. Solski: *Geometra polski, to jest nauka rysowania, podziału, przemieniania i rozmierzania linii, angulów, figur i brył pełnych. Podany do druku przez X. Stanisława Solskiego, S. J., w Krakowie roku 1683*. Drukarnia Jerzego i Mikołaja Schedlów. Por. F. Kucharzewski: *Piśmiennictwo techniczne polskie*. T. I. Warszawa 1911, s. 110–111, T. Nowak: *Cztery wieki polskiej książki technicznej 1450–1850*. PWN, Warszawa 1961, s. 103–106.
- ⁷ Por. F. Kucharzewski: *Piśmiennictwo...*, s. 111; T. Nowak: *Cztery wieki...*, s. 107.
- ⁸ S. Solski: *Architekt polski to jest nauka ulżenia wszelkich ciężarów. Używania potrzebnych machin, ziemnych i wodnych. Stawiania ozdobnych kościołów małym kosztem. O proporcji rzeczy wysoko stojących. O wschodach i pawimentach. Czemu się chronić i trzymać w budynkach od fundamentów aż do dachu. O fortyfikacji. I o innych trudnościach budowniczych. Do druku podany przez X. Stanisława Solskiego S. J., w Krakowie roku 1690*. Drukarnia Mikołaja Aleksandra Schedla. Por. F. Kucharzewski: *Piśmiennictwo techniczne polskie*. T. II. Warszawa 1921, s. 337–345, T. Nowak: *Cztery wieki...*, s. 107–113.
- ⁹ S. Solski: *Architekt...*, s. 192.
- ¹⁰ Tamże, s. 410.
- ¹² J. Burszta, Cz. Łuczak: *Wstęp...*, s. XIV–XV.
- ¹³ S. Solski: *Architekt...*, s. 104–157.
- ¹⁴ Tamże, s. 134.
- ¹⁵ Tamże, s. 8–9, 104–105, 132. Podobny układ zachowany jest w dziele *Geometra...*, gdzie część I zabawy I zawiera „Terminy geometry albo zebranie słów geometrycznych, częścią z łacińskiego i z greckiego języka na polski przeformowanych, częścią polskich wprawdzie, ale niezwyčajnych”, por. S. Solski: *Geometra...*, s.1–7.
- ¹⁶ S. Solski: *Architekt...*, s.122, 126.
- ¹⁷ K. Ochęduszek: *Koła zębate. Konstrukcja*. WNT, Warszawa 1971, s.39.
- ¹⁸ S. Solski : *Geometra...*, s. 272 (zabawa VI). Autor tak pisze: „Według Archimedesza, jeżeli dyjаметer cyrkułu postawisz 7, obwód jego będzie 22...”.
- ¹⁹ S. Solski: *Architekt...*, s. 132–133.
- ²⁰ K. Ochęduszek: *Koła...*, s.39–40.
- ²¹ S. Solski: *Architekt...*, s. 133, 135,
- ²² Tamże, s. 134.
- ²³ Tamże, s.137–138.
- ²⁴ Tamże, s. 177.
- ²⁵ Tamże, s. 135.
- ²⁶ Tamże, s. 139. S. Solski starając się aby jego działo było znane jak najszerszemu gronu czytelników, przy trudniejszych partiach materiału zamieszczał uwagi ułatwiające przyswojenie, np. „Prostacy miasto słusznego wyrachowania dyjаметru według proporcji 22 do 7 mogą brać część trzecią liczby obwodu koła...” por. tamże, s. 133.
- ²⁷ Tamże, s.140–145.
- ²⁸ Tamże, s.147–148.
- ²⁹ Tamże, s. 150.
- ³⁰ Tamże, s. 150–152.
- ³¹ Tamże, s.152–157. Omawiając przykłady autor odwołał się tu do własności CLIV zabawy VI *Geometry polskiego*, dotyczącej podziału okręgu na sześć części oraz do nauki XLIX oraz nauki L zabawy IV tego dzieła, dotyczącej podziału okręgu na pięć lub siedem części. Por. S. Solski: *Geometra...*, s. 268 (zabawa VI), s.131–133 (zabawa IV).
- ³² S. Solski: *Architekt...*, s.180–183.
- ³³ Autorka niniejszego opracowania przygotowuje publikację na temat sposobu zapisu konstrukcji w dziełach S. Solskiego.

**The methods of calculating toothed gears in the light
of the works of Stanisław Solski (1622–1701)**

SUMMARY

One of the most precious works in the history of Polish technical writing is *Architekt polski* (The Polish architect) by Stanisław Solski (1622-1701). The book is generally regarded as a manual of mechanics and hydrotechnics, but the fragment of the book which is subject to discussion in the present paper makes a major contribution to the history of the development of another technical discipline, namely the fundamentals of machine construction. The relevant chapters deal with the methods of selecting toothed wheels and gears. Solski provided the basis for calculating the dimensions of the wheels such as the diameter, radius or nominal pitch, as well as the number of teeth. He also discussed the methods of selecting the mating wheel. In providing the theoretical basis for the division of the circle into the required number of sections, which is essential in making a toothed wheel, Solski referred the readers to his earlier work *Geometra polski* (The Polish geometrician). Writing his book in the 17th century, Solski was aware of his potential readers' insufficient ability to perform some mathematical operations. He therefore also devised a table that enabled the readers to select the driving and driven wheels in a quick and easy way.