

Anatoliy Filippov, Aleksey Beshun, Yuriy Gerasimchuk, Olga Gluhovska,
Ludmila Evchenko*

ДИНАМИКА ДИЗЕЛЬНОГО ДРЦ (ДВИГАТЕЛЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ ОТКЛЮЧЕНИЕМ ОТДЕЛЬНЫХ РАБОЧИХ ЦИКЛОВ)

Аннотация. Приведены результаты теоретических исследований динамических показателей четырёхтактного четырёхцилиндрового дизельного двигателя, регулирование мощности которого осуществляется отключением отдельных рабочих циклов.

Ключевые слова: динамика, регулирование мощности, рабочий цикл,

Стремление снизить расход топлива и вредные выбросы с отработавшими газами приводит зачастую к значительному усложнению конструкций двигателей внутреннего сгорания. Но есть и другой, более рациональный подход, основанный на анализе наиболее применяемых в эксплуатации режимов работы двигателей и разработке для конкретных режимов методов и способов снижения расхода топлива.

Многочисленными исследованиями установлено, что наиболее применяемыми в эксплуатации режимами работы автомобильных двигателей в условиях городского движения являются холостой ход и малые нагрузки. Работа тракторных двигателей также характеризуется значительной продолжительностью эксплуатации на холостом ходу и малых нагрузках. Это объясняется большим объемом транспортных работ, включая переезд с порожним прицепом, а также частой разрядкой аккумуляторных батарей. На режимах малых нагрузок и холостого хода значительно ухудшается рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания и увеличиваются потери тепла. Особенно остро это проявляется в бензиновых двигателях, в которых дополнительное снижение этих показателей происходит из-за количественного регулирования мощности.

В отличие от бензиновых двигателей, в дизельных отсутствует дроссельная заслонка, а значит, нет и дополнительных потерь на режимах малых нагрузок и холостого хода. Но и у них на этих режимах ухудшается рабочий процесс, хотя

* Anatoliy Filippov, Prof. Sc. D., Aleksey Beshun, Eng., Yuriy Gerasimchuk, Olga Gluhovska Eng., Ludmila Evchenko Eng., The National Agricultural University of Ukraine, Ukraine

регулирование мощности происходит только за счет изменения количества впрыскиваемого в камеру сгорания топлива при практически одинаковом количестве воздуха в смеси. Поэтому на режимах холостого хода и небольших нагрузок малые цикловые подачи топлива обуславливают чрезмерное обеднение горючей смеси с коэффициентом избытка воздуха α даже более пяти. Это вызывает переохлаждение цилиндров двигателя и повышение потерь тепла в систему охлаждения. Кроме этого, увеличивается неравномерность подачи топлива по цилиндрам и из-за снижения давления ухудшается качество его распыления форсунками, что повышает период задержки самовоспламенения (жесткая работа дизеля), а попадающее на стенки цилиндра топливо смывает и разжижает масло. Все эти факторы в итоге приводят к снижению коэффициента полезного действия, закоксовыванию распылителей форсунок и интенсивному нагароотложению при длительной работе двигателя на таких режимах.

Повысить эффективность работы дизельного двигателя большого объема на холостом ходу и малых нагрузках можно путём применения метода регулирования мощности отключением отдельных рабочих циклов (ДРЦ) [Филиппов 1996, Філіппов и др. 2001, Войтюк 2004], который в отличие от метода отключения части цилиндров является более совершенным [Філіппов и др. 2001].

С целью всестороннего изучения влияния регулирования мощности дизеля указанным методом на его экономические, экологические и динамические показатели в Национальном аграрном университете (НАУ) ведутся как теоретические, так и экспериментальные исследования, результаты которых опубликованы в печатных трудах.

Отключение отдельных рабочих циклов на частичных нагрузках и холостом ходу сопровождается увеличением неравномерности крутящего момента, что является одним из недостатков данного метода, а также одной из основных причин вибраций двигателя. Поэтому при решении вопроса о целесообразности использования способа отключения циклов необходимо исследовать динамические параметры дизельного ДРЦ. Особенно важно это для автомобильных двигателей, на уровень шума и вибраций которых наложены жесткие ограничения.

Исчерпывающую информацию о вибрации двигателя дает математическое моделирование его динамики, поэтому с целью изучения динамических параметров дизельного ДРЦ была уточнена математическая модель динамики поршневых ДРЦ, разработанная в работах [Филиппов 1996, Войтюк 2004], которая не учитывает динамики газовых процессов, а также колебаний коленчатого вала.

В работе [Филиппов 1996] адекватность математической модели динамики поршневого ДРЦ оценивалась по суммарному крутящему моменту. Разница в расчетных и теоретических значениях не превышала 6%. Достаточно высокая адекватность математической модели, которая кардинально не отличается от данной дала основание ограничиться исследованиями динамики дизельного ДРЦ.

Целью данной статьи является количественный анализ результатов теоретических исследований динамики дизельного ДРЦ.

Весь комплекс теоретических исследований выполнен на математической модели в проблемной научно-исследовательской лаборатории тепловых двигателей и альтернативных топлив НАУ.

Объект исследований – 4-тактный 4-цилиндровый дизельный двигатель с рядным размещением цилиндров.

Динамический расчет дизеля с регулированием мощности отключением отдельных рабочих циклов выполняется путем интегрирования дифференциального уравнения движения, которое связывает угловую скорость коленчатого вала с индикаторным моментом, моментом от сил инерции, моментом от сил трения и моментом сопротивления и решается с помощью специально разработанной программы для персонального компьютера. Программа составлена на языке ФОРТРАН и даёт возможность применять стандартное решение данного уравнения методом Рунге-Кутты. Она содержит собственно главную программу и подпрограмму *SUM*.

Подпрограмма $SUM(N, M, X, Q, i, S)$ по значениям переменного момента инерции поступательно движущихся масс, составляющих момента от сил трения и индикаторного момента одного цилиндра определяет соответствующие суммарные моменты на валу двигателя от всех (в данном случае четырех) цилиндров.

Интегрирование уравнения проводится в интервале, на котором расположены 8 рабочих циклов в каждом цилиндре. На этом интервале определяются средние значения, средние квадратичные отклонения и коэффициенты вариации угловой скорости индикаторного крутящего момента, момента трения и эффективного крутящего момента.

В данной работе степень регулирования равняется $(1/8) \cdot N_i$ в 4-цилиндровом двигателе. Исходя из этого, закономерность отключения рабочих циклов может определяться последовательностью $2 \cdot i_c$. Из каждых $2 \cdot i_c$ рабочих циклов пропускается m , где $m = 1, 2, \dots, 2 \cdot i_c$.

Для 4-цилиндрового двигателя алгоритм отключения рабочих циклов может быть представлен в виде последовательности, представленной в таблице 1.

Таблица 1. Последовательность отключения рабочих циклов для 4-цилиндрового ДРЦ со степенью регулирования $(1/8) \cdot N_i$

Table 1. The order of switching-off working cycles in a 4-cylinder self-ignition engine with the regulation ratio $(1/8) \cdot N_i$

Отключенная часть индикаторной мощности	Номера цилиндров в порядке их работы							
	1	3	4	2	1	3	4	2
	Номера отключенных циклов							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$(0/8) \cdot N_i$	0	0	0	0	0	0	0	0
$(1/8) \cdot N_i$	1	0	0	0	0	0	0	0
$(2/8) \cdot N_i$	1	0	0	0	5	0	0	0
$(3/8) \cdot N_i$	1	0	0	4	0	0	7	0
$(4/8) \cdot N_i$	1	0	3	0	5	0	7	0
$(5/8) \cdot N_i$	1	0	3	0	5	6	0	8
$(6/8) \cdot N_i$	1	2	3	0	5	6	7	0
$(7/8) \cdot N_i$	1	2	3	4	5	6	7	0
$(8/8) \cdot N_i$	1	2	3	4	5	6	7	8

Цифры в каждой строке означают, что из каждых 8 рабочих циклов пропускается, в зависимости от нагрузки, определенное их количество. Например, для 4-ой строки должны быть пропущены 1, 4 и 7 рабочих цикла, то есть отключается 3/8 индикаторной мощности дизеля. Отключение рабочих циклов осуществлялось из условия обеспечения минимальной неравномерности хода двигателя.

На рисунках 1 и 2, а также в табл. 3 и табл. 4 представлены результаты расчета основных показателей динамики дизельного четырехцилиндрового ДРЦ.

Расчеты выполнены для всего рабочего диапазона частот вращения коленчатого вала дизеля с шагом 100 об/мин.

В табл. 2 и на рис. 1 приведены зависимости неравномерностей индикаторного крутящего момента в зависимости от режима отключений циклов при работе во всем рабочем диапазоне частот вращения коленчатого вала исследуемого дизеля ($n = 600 \dots 1800$ об/мин) с шагом 100 об/мин.

Таблица 2. Расчетные (теоретические) значения коэффициента неравномерности индикаторного крутящего момента μ двигателя при разных скоростных режимах и количестве отключенных циклов

Table 2. Calculated (theoretical) values of an engine indicator torque variability coefficient for different speeds of successively switched-off working cycles.

Отключенная часть индикаторной мощности	Номера цилиндров в порядке их работы							
	1	3	4	2	1	3	4	2
	Номера отключенных циклов							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$(0/8) \cdot N_i$	0	0	0	0	0	0	0	0
$(1/8) \cdot N_i$	1	0	0	0	0	0	0	0
$(2/8) \cdot N_i$	1	0	0	0	5	0	0	0
$(3/8) \cdot N_i$	1	0	0	4	0	0	7	0
$(4/8) \cdot N_i$	1	0	3	0	5	0	7	0
$(5/8) \cdot N_i$	1	0	3	0	5	6	0	8
$(6/8) \cdot N_i$	1	2	3	0	5	6	7	0
$(7/8) \cdot N_i$	1	2	3	4	5	6	7	0
$(8/8) \cdot N_i$	1	2	3	4	5	6	7	8

Видно, что с увеличением количества отключенных циклов на всех частотных режимах неравномерность крутящего момента монотонно растет по закону вогнутой параболы и на режиме отключений 6/8 при частоте вращения $n = 600$ об/мин это увеличение максимальное. Значение μ составляет 24,17, и по сравнению с номинальным режимом увеличивается в 5,5 раз. При этом, как показали экспериментальные исследования в работе [Филиппов 1996], может также в 1,5...1,7 раз увеличиваться амплитуда крутящего момента.

Как видно из рис. 1, μ существенно зависит также от частоты вращения. Наименьшие значения μ имеют место на режиме $n = 1100$ об/мин во всем диапазоне отключений (1/8...6/8) кроме режима 0/8 – то есть режима без отключений циклов, для которого минимальные значения μ имеют место при частоте $n = 1500$ об/мин, то есть с определенным приближением на режиме

максимального крутящего момента (согласно паспортным данным исследуемого дизеля $n_M = 1400$ об/мин).

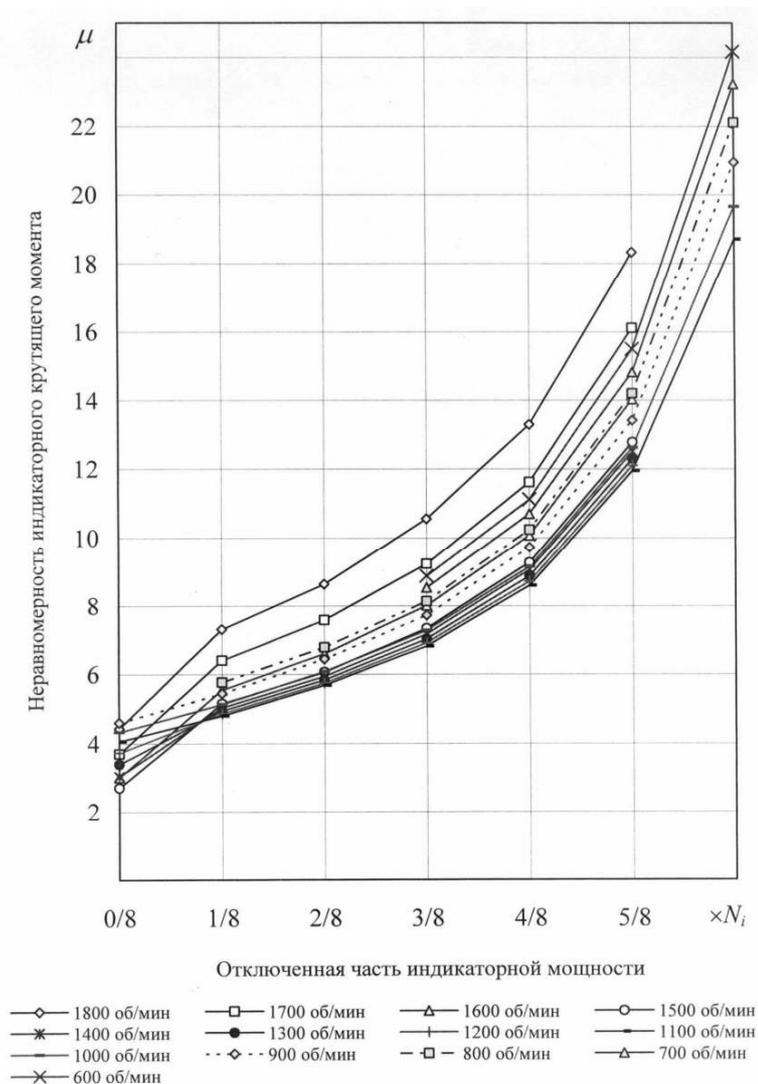


Рис. 1. Зависимость неравномерности индикаторного крутящего момента μ от количества отключенных циклов и частоты вращения

Fig. 1. The dependency of an indicator torque variability on the number of the switched-off working cycles and rotations

В табл. 3 и на рис. 2 приведенные расчетные (теоретические) значения коэффициента неравномерности вращения вала двигателя δ при разных скоростных режимах и количестве отключенных циклов.

Из таблицы и приведенного рисунка видно, что с увеличением числа отключенных циклов коэффициент неравномерности хода двигателя δ увеличивается. Он в значительной степени зависит от режима отключений. Например, на режимах 4/8 и 6/8 значение δ существенно меньше по сравнению с режимом отключения 5/8. Особенно обращает на себя внимание уменьшение неравномерности хода двигателя на режиме 4/8 отключений рабочих циклов, то есть при отключении половины индикаторной мощности.

Таблица 3. Расчетные (теоретические) значения коэффициента неравномерности вращения вала двигателя δ при разных скоростных режимах и количестве отключенных циклов

Table 3. Calculated (theoretical) values of an engine crankshaft rotations variability coefficient for different speeds of successively switched-off working cycles

Частота вращения, об/мин	Коэффициент неравномерности хода (частоты вращения) δ двигателя							
	Отключенная часть индикаторной мощности двигателя							
	0/8	1/8	2/8	3/8	4/8	5/8	6/8	7/8
1800	0,0119	0,0307	0,0275	0,0476	0,0391	0,0332	–	–
1700	0,0105	0,0309	0,0281	0,0473	0,0381	0,0342	–	–
1600	0,0094	0,0303	0,0288	0,0485	0,0379	0,035	–	–
1500	0,0083	0,0318	0,0301	0,0514	0,0375	0,0348	–	–
1400	0,0078	0,0361	0,0355	0,0535	0,0371	0,0407	–	–
1300	0,0185	0,0442	0,0444	0,057	0,0363	0,0477	–	–
1200	0,0296	0,0544	0,0567	0,0673	0,0384	0,0604	–	–
1100	0,0458	0,0679	0,0748	0,0778	0,0464	0,0758	0,0541	–
1000	0,0519	0,0860	0,1024	0,0962	0,057	0,1025	0,0697	–
900	0,0699	0,1109	0,1270	0,1214	0,0652	0,1309	0,0924	–
800	–	0,1558	0,1665	0,157	0,0865	0,1861	0,1226	–
700	–	–	–	0,2019	0,1185	0,242	0,1736	–
600	–	–	–	0,2801	0,1695	0,3874	0,2489	–
500	–	–	–	–	–	–	0,3669	0,5078

Существенным является влияние на неравномерность хода двигателя частоты вращения коленчатого вала. При уменьшении частоты вращения неравномерность δ стремительно растет, достигая наибольших значений на режиме минимального

холостого хода ($n = 600$ об/мин). Характерным также есть то, что в диапазоне частот 1800... 1400 об/мин числовые значения неравномерности δ отличаются не значительно.

При последующем уменьшении частоты вращения разница становится более существенной.

Наибольшая неравномерность имеет место на режимах 5/8 и 3/8 отключений рабочих циклов.

Видно, что при работе двигателя на режиме минимального холостого хода во всем диапазоне отключений рабочих циклов неравномерность хода двигателя выше допустимых значений.

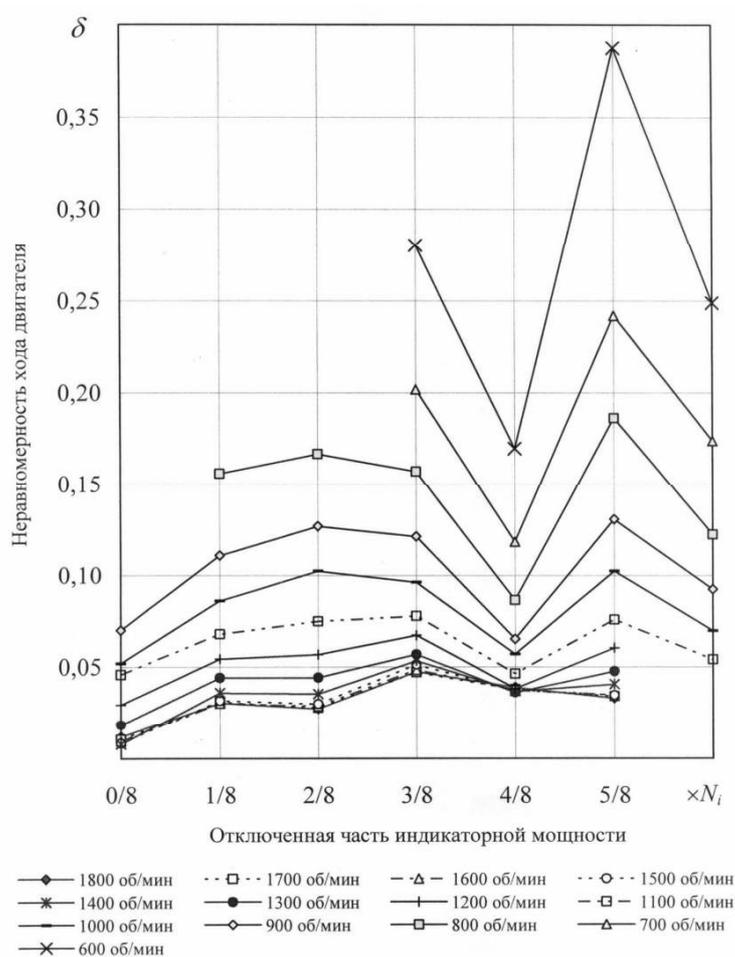


Рис. 2. Зависимость неравномерности хода двигателя δ от количества отключенных циклов и частоты вращения

Fig. 2. The dependency of an engine work's variability on the number of switched-off working cycles and rotational speed

При работе на режиме отключений 6/8 (что соответствует работе двигателя на холостом ходу) при $n = 600$ об/мин составляет 0,2489, в то время как допустимые значения для тракторных двигателей на номинальном режиме 0,010...0,016, то есть у 15...25 раз выше. Данные по допустимым значениям δ на режиме минимального холостого хода в литературе отсутствуют, хотя δ для этих режимов будет иметь большие значения, чем на номинальном режиме что объясняется целым рядом причин, например межцилиндровой и межцикловой нестабильностью максимального давления P_z , которое влияет на неравномерность δ , являющейся относительной величиной, значительным ухудшением рабочего процесса, неудовлетворительной работой топливной аппаратуры, а также другими причинами.

Но с учетом момента инерции средства, на котором будет устанавливаться дизельный ДРЦ, например автомобиля, неравномерность хода двигателя и его крутящего момента резко уменьшается, комфортность последнего при этом будет нарушаться незначительно [Филиппов 1996].

Следует отметить, что с помощью уточнённой математической модели проверялась также возможность уменьшения минимальной частоты вращения холостого хода от $n = 600$ об/мин до $n = 500$ об/мин. Как показали исследования, такая возможность имеется. При этом двигатель будет работать на режиме $(1/8) \cdot N_i$. Однако неравномерность хода будет составлять в этом случае 0,5078, а неравномерность индикаторного крутящего момента – 59,23, что дополнительно увеличивает оба показателя приблизительно в 2 раза.

На основании проведенной работы могут быть сделаны следующие выводы:

- разработана методика для оценки динамических параметров дизельного двигателя, регулирование мощности которого осуществляется отключением отдельных рабочих циклов посредством прекращения подачи топлива в цилиндры;
- проведенные с помощью оригинальной математической модели исследования неравномерности хода 4-цилиндрового рядного дизеля в зависимости от частоты вращения и количества отключенных циклов показали, что при увеличении последних неравномерность хода увеличивается, достигая наибольших значений при 3/8 и особенно 5/8 отключений N_i ;
- существенно на неравномерность хода двигателя влияет частота вращения, уменьшение которой приводит к увеличению неравномерности;
- наибольшая неравномерность угловой скорости коленчатого вала $\delta = 0,3874$ имеет место на режиме 5/8 отключений при $n = 600$ об/мин, что существенно выше, чем без отключения циклов;
- неравномерность крутящего момента двигателя при работе на режиме минимального холостого хода ($n = 600$ об/мин; 6/8 отключений) увеличивается приблизительно в 5,5 раз по сравнению с неравномерностью на номинальном режиме.

Для проведения дальнейших исследований динамических параметров дизельного ДРЦ при регулировании его мощности посредством синхронного отключения подачи топлива и органов системы газораспределения, в разработанную математическую модель необходимо внести соответствующие коррективы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Філіппов А.З. 1996:** Повышение экономических и экологических показателей ДВС отключением отдельных рабочих циклов: Дис. . д-ра техн. наук: 05.04.02. К., 460 с.
2. **Войтюк С.Д. 2004:** Підвищення економічних і екологічних показників роботи бензинового двигуна на холостому ході відключенням окремих робочих циклів: Дис. канд. техн. наук: 05.05.03. К., 178 с.
3. **Філіппов А., Бешун О., Krasowski E. 2001:** Про можливість регулювання потужності багатociліндрових дизельних двигунів методом відключення окремих робочих циклів. TeKa Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, Національний аграрний університет, Київ, Polska Akademia Nauk Oddzial w Lublinie. Т. 1., с. 33–37.
4. **Філіппов А.З., Бешун О.А., Атаманенко М.Є. 2003:** Деякі результати безмоторних випробувань макету системи паливоподачі дизеля з регулюванням потужності відключенням окремих робочих циклів. Науковий вісник Нац. аграрн. ун-ту. Київ. Вип. 60, с. 330–334.
5. Пат. 53398 А Україна, 7 F02D17/02, F02M63/02. Система автоматичного регулювання потужності багатociліндрового дизеля.
6. **А.З. Філіппов, О.А. Бешун, М.Є. Атаманенко (Україна).** – № 2002053995. Заявл. 16.05.2002; Опубл. 16.05.2003, Бюл. №1. 2 с.
7. **Філіппов А.З., Хандрос М.Я., Бешун О.А., Войтюк С.Д. 2003:** Математична модель робочого процесу двигуна з регулюванням потужності відключенням окремих робочих циклів (ДРЦ). Збірник наукових праць Національного аграрного університету Механізація сільськогосподарського виробництва. К.: НАУ. Том XIV, с. 49–55.
8. **Бешун О.А. 2004:** Експериментальна моторна установка для дослідження робочого процесу дизеля з регулюванням потужності відключенням окремих робочих циклів (ДРЦ). Автошляховик України: Окремий випуск. Вісник Північного наукового центру ТАУ. Вип. 7, с. 139–144.
9. **Філіппов А.З., Бешун О.А. 2004:** Деякі результати експериментальних моторних досліджень паливної економічності дизельного двигуна з регулюванням потужності відключенням окремих робочих циклів (ДРЦ). Науковий вісник Нац. аграрн. ун-ту. Київ. Вип. 73, с. 309–318.

DYNAMICS OF A DIESEL ENGINE, WITH THE POWER CONTROLLED
BY SWITCHING - OFF SEPARATE WORKING CYCLES

Summary. The article presents results of theoretical researches on the dynamics of a four-stroke multicylinder diesel engine, in which power is controlled by switching-off separate working cycles.

Keywords: dynamics, engine, controlled

Reviewer: Eugeniusz Krasowski, Prof. D. Sc. Eng.