

УДК 621.396.6

В. В. Козлов, доктор технических наук, профессор, Черноморский ВВМУ имени П. С. Нахимова, Севастополь
И. В. Медведь, кандидат технических наук, Черноморский ВВМУ имени П. С. Нахимова, Севастополь
Т. В. Зонтова, кандидат технических наук, Черноморский ВВМУ имени П. С. Нахимова, Севастополь

ЯВЛЕНИЕ ВТОРИЧНОГО ПРОБОЯ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ КОММУТАТОРОВ

С тремительное развитие систем критического назначения выводит на первый план вопросы создания коммутаторов, обладающих максимально возможным временем срабатывания. В этом отношении наиболее перспективным является реализация механизма быстрого электрического взрыва проводников [1–3]. Явление быстрого электрического взрыва проводников (взрывообразное разрушение металлов при прохождении импульса тока большой плотности ($j \approx 10^7 \text{ A/cm}^2$)) уже долгие годы используется в различных технических приложениях [4]. Однако только в последнее время появились работы, направленные на теоретическое обоснование использования данного явления, а точнее, эффекта вторичного пробоя продуктов детонации электровзрывающегося проводника (ЭВП), для создания быстродействующих коммутаторов [5, 6]. Вторичный пробой возникает на третьем этапе электрического взрыва, когда материал проводника принимает свойства газа с высокой плотностью и температурой (давление продуктов электрического взрыва $\approx 10^3$ атм.). Данный этап характеризуется высокими значениями давления газообразных продуктов электрического взрыва и малой средней длиной пробега электронов. Поэтому пробой между электродами, удерживающими ЭВП, не возникает, и образуется пауза тока. Длительность паузы тока характеризует время до образования вторичного пробоя и лежит достаточно в широком диапазоне. В связи с этим ставится задача определения основных параметров ЭВП, отвечающих за длительность существования паузы тока.

Для формирования последовательности импульсных воздействий наносекундной длительности можно предложить структуру (рис. 1), генератор мощных электромагнитных излучений (МЭМИ), нагрузку (антенную систему) и набор ЭВП, последовательно включаемых в цепь ключами (коммутаторами). Наличие в схеме ЭВП обуславливается необходимостью обострения электрической мощности, передаваемой с генератора на нагрузку [7].

Момент времени срабатывания каждого ключа определяется длительностью нагрева (τ_ϕ) и превращения предыдущего ЭВП в мелкодисперсную массу и экспериментально определенным периодом повторения воздействий.

В работах [8–10] показано, что функциональное поражение современных элементов РЭС полиимпульсными воздействиями наблюдалось при выполнении следующего условия:

$$\frac{\tau_\phi}{T_{\text{повт}}} \geq 5 \cdot 10^{-7}.$$

Для создания быстродействующих коммутаторов (рис. 1) можно также использовать явление электрического взрыва, а точнее, явление вторичного пробоя. Механизм работы таких коммутаторов будет включать в себя три основных этапа. На первом этапе происходит электрический взрыв ЭВП (разрыв коммутируемой цепи), подключаемого в цепь генератора. На втором этапе происходит расширение продуктов детонации электрического взрыва с уменьшением их давления и плотности и увеличением средней длины пробега (ключ открыт). Третьему этапу соответствует вторичный пробой продуктов электрического взрыва (замыкание цепи ключом).

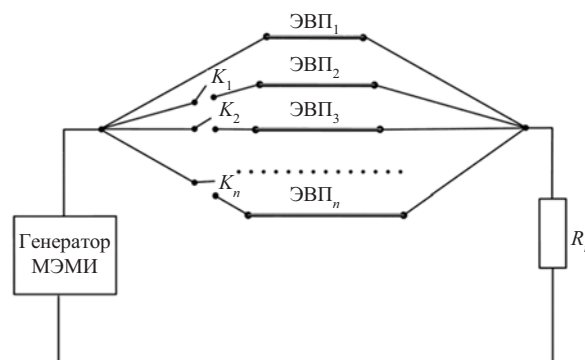


Рис. 1. Структурное расположение ЭВП для формирования последовательности мощных наносекундных импульсных воздействий

Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенный в работах [11, 12], показал, что ЭВП по типу вторичного пробоя можно разделить на две группы. Для каждой из групп он развивается по определенному сценарию, при этом образуются типичные для данной группы структуры продуктов детонации.

Для первой группы, объединяющей металлы с высокой температурой плавления и высоким начальным удельным сопротивлением (палладий, вольфрам, молибден, титан), характерен быстрый (до 10^{-14} и 10^{-3} с) шунтирующий пробой вдоль поверхности проволоочки (по парам металла в воздухе) и эффективный перехват разрядного тока короной (рис. 2, а, в) [13].

При реализации данного вида вторичного пробоя на протяжении всей паузы тока разрядный промежу-

ток только частично сохраняет свои изолирующие свойства (рис. 2, а, в), следовательно, на втором эта-

пе работы такого коммутатора невозможно полностью осуществить разрыв цепи.

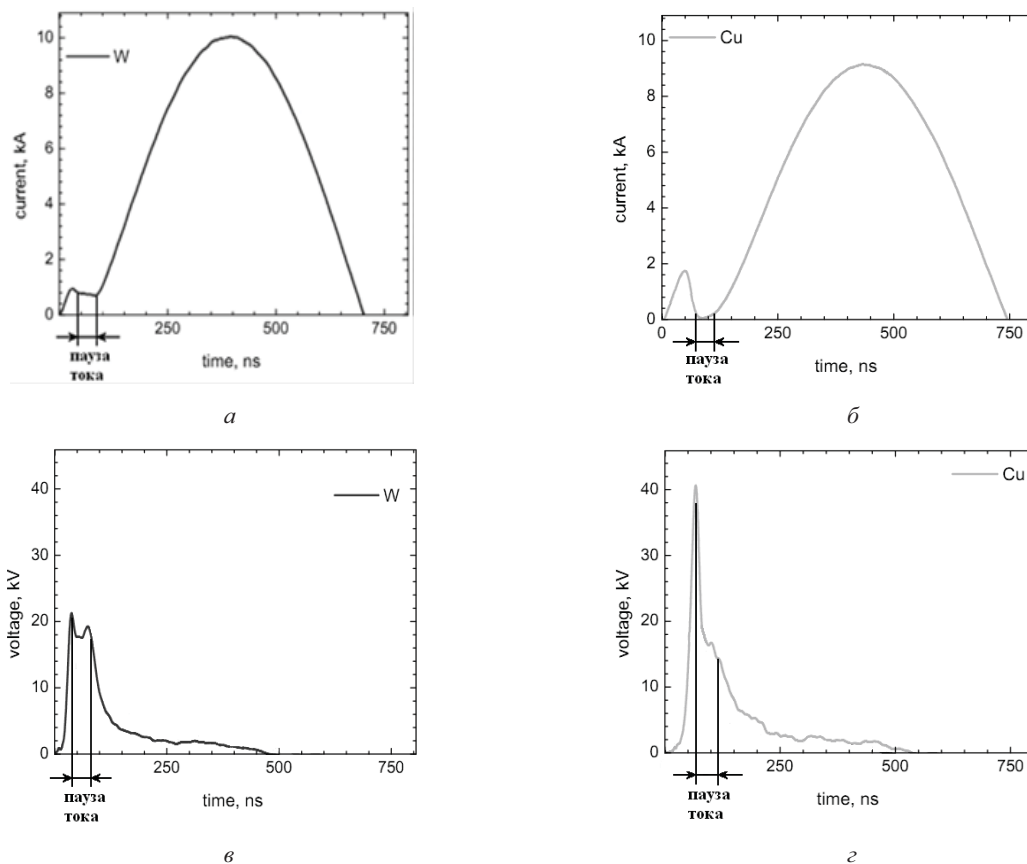


Рис. 2. Осциллограммы тока (а, б) и напряжения (в, г) при электрическом взрыве вольфрамового (а, в) и медного (б, г) проводников диаметром 0,025-10-3 м и длиной 12-10-3 м с учетом возникновения паузы тока и вторичного пробоя

Для второй группы, объединяющей легкоплавкие и хорошо проводящие металлы (свинец, серебро, алюминий, медь, золото) характерно то, что вторичный пробой происходит только при уменьшении давления и плотности продуктов детонации до критических значений. До этого момента ток, протекающий через продукты электрического взрыва, равен нулю, а напряжение максимально (рис. 2, б, г) [14, 15].

Таким образом, для создания быстродействующих ключей наиболее подходит вторая группа ЭВП, для которых длительность паузы тока (второго этапа) зависит от скорости расширения, следовательно, и от давления (плотности) уже ионизированных продуктов электрического взрыва.

В качестве генератора МЭМИ выберем спиральный взрывомагнитный генератор (ВМГ), рассмотренный в работе [16]. В этом случае на единицу длины легкоплавкого ЭВП при генерации ударной волны во временном интервале $t^* < t < t^{**}$ затрачивается энергия

$$W_{y.b} = \frac{A_2}{20D^2};$$

$$W_{y.b} = \frac{A_2}{20D^2} \left[\frac{1}{(t^*)^5} \left(\ln \left(\frac{mDt^*}{Ml^*} \right) - 0,6 \right)^2 - \frac{1}{(t^{**})^5} \left(\ln \left(\frac{mdt^{**}}{Ml^{**}} \right) - 0,6 \right)^2 \right],$$

$$\text{где } A_2 = \frac{9d^4 I_2^2 R_{ЭВП}^3 \rho_0^3}{8\pi \rho_{ЭВП}^3 (W_L^*) \left[\mu_0 \pi (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) K \left(\frac{r_{cp}}{l^*} \right) \right]^2};$$

t^* и t^{**} – время достижения, соответственно, температуры плавления и превращения ЭВП в мелкодисперсную массу; I_2 – постоянный ток, протекающий в контуре ВМГ до подрыва взрывчатого вещества (ВВ); $R_{ЭВП}$, $\rho_{ЭВП}$ и l – активное сопротивление, плотность и длина ЭВП соответственно; ρ_0 – плотность окружающего ЭВП газа; W_L^* – удельная энергия сублимации ЭВП; d – диаметр проволоки соленоида ВМГ; r_1 и r_2 – радиусы витков соленоида ВМГ в начале и в конце спирали соответственно;

$l^* = dN^* + kN^*$ – первоначальная длина соленоида ВМГ; N^* – первоначальное количество витков соленоида; k – расстояние между витками; K – поправочный множитель; r_{cp} – средний радиус витков соленоида; m – масса ВВ; M – масса лайнера ВМГ; D – скорость детонации ВВ.

Скорость движения $V_{п.д}(t)$, плотность $\rho_{п.д}(t)$, давление $P_{п.д}(t)$ и температуру $T_{п.д}(t)$ ионизированных продуктов детонации при электрическом взрыве можно определить, основываясь на модели мгновенного сильного взрыва цилиндрической конфигурации [17, 18]:

$$\left. \begin{aligned} V_{п.д}(t) &= \frac{2}{\gamma+1} V_{y.в}(t) \left(1 - \frac{c^2}{V_{y.в}^2(t)} \right) = \\ &= \frac{2}{\gamma+1} V_{y.в}(t) f_1(t), \\ \rho_{п.д}(t) &= \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \rho_0 \left(1 + \frac{2}{\gamma-1} \frac{c^2}{V_{y.в}^2(t)} \right) = \\ &= \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \rho_0 f_2(t), \\ P_{п.д}(t) &= \frac{2}{\gamma+1} \rho_0 V_{y.в}^2(t) \left(1 - \frac{\gamma-1}{2\gamma} \frac{c^2}{V_{y.в}^2(t)} \right) = \\ &= \frac{2}{\gamma+1} \rho_0 V_{y.в}^2(t) f_3(t), \\ T_{п.д}(t) &= \frac{P_{п.д}(t)}{R \rho_{п.д}(t)}, \end{aligned} \right\} (1)$$

где ρ_0 и c – плотность газа и скорость звука перед ударной волной соответственно; $V_{y.в}(t)$ – скорость ударной волны; γ – показатель адиабаты; R – газовая постоянная. Поправочные функции f_1, f_2, f_3 позволяют учитывать противодействие и зависят от соотношения $\frac{c^2}{V_{y.в}^2(t)}$.

Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенный в работах [19, 20], показал, что для скорости движения фронта ударной волны на всем интервале времени расширения продуктов детонации электрического взрыва как легкоплавких ($V_{y.вCu\min} = 3200$ м/с), так и тугоплавких ($V_{y.вW\min} = 4000$ м/с) проводников выполняется соотношение $V_{y.в}^2(t) > c^2$, что дает возможность не учитывать противодействие ($f_1 \approx f_2 \approx f_3$).

В работах [21, 22] приводится закон изменения радиуса цилиндрической ударной волны

$$r_{y.в}(t) = \left(\frac{W_{y.в}}{\rho_0} t^2 \right)^{\frac{1}{5}}, \text{ который можно связать с давлени}$$

ем за фронтом (см. (1)) через энергию, передаваемую от спирального взрывомагнитного генератора (СВМГ) взрывающемуся проводнику на интервале $t^* < t < t^{**}$:

$$V_{y.в}(t) = \frac{1}{2\sqrt{t}} \sqrt[4]{\frac{W_{y.в}}{\rho_0}};$$

$$P_{п.д}(t) = \frac{1}{2t(\gamma+1)} \sqrt{W_{y.в} \rho_0},$$

или

$$P_{п.д}(t) = \frac{3\rho_0 l^2 I_2}{40\pi^3 (W_L^*)^3} \frac{\rho_{ЭВП}^3}{\left[(t^*)^5 \left(\ln \left(\frac{m d t^*}{M l^*} \right) - 0,6 \right)^2 - \frac{1}{(t^{**})^5} \left(\ln \left(\frac{m d t^{**}}{M l^*} \right) - 0,6 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \frac{1}{4t_{п.т}(\gamma+1)D \left[\mu_0 \pi (r_1^2 + r_2^2) K \left(\frac{r_{cp}}{l} \right) \right]} \quad (2)$$

На рис. 3 представлены временные зависимости изменения давления продуктов детонации, образующихся при электрическом взрыве медных проводников различной длины.

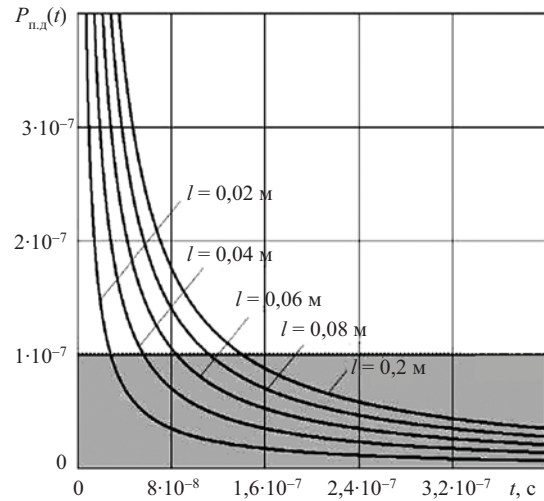


Рис. 3. Временные зависимости изменения давления продуктов детонации, образующихся при электрическом взрыве медных проводников одинакового радиуса ($r_0 = 0,08$ мм) и различной длины

Анализируя данные зависимости, необходимо заметить, что при уменьшении длины медного ЭВП увеличивается скорость изменения давления продуктов детонации, следовательно, уменьшается пауза тока $t_{п.т}$. Именно уменьшение давления продуктов детонации до критического значения $P_{п.д,кр}$ будет характеризовать длительность существования паузы

тока. При $P_{п.д} = P_{п.д.кр}$ расширение газообразных продуктов детонации приводит к тому, что средняя длина пробега достигает критического значения, число носителей заряда быстро увеличивается, возникает электрическая дуга и начинается вторичный пробой. В экспериментальных работах [23, 24] получены численные значения критического давления $P_{п.д.кр} = 10,2$ МПа, при котором происходил электрический пробой продуктов детонации электрического взрыва медных проводников (см. рис. 3).

В этом случае выражение (2), разрешенное относительно $t_{п.т}$, можно представить в виде

$$t_{п.т} = \frac{\left(3\rho_0 d^2 I_2 \left[\frac{\rho_{ЭВП}^3}{40\pi^3 (W_L^*)^3} \frac{1}{\left((i^*)^5 \left(\ln \left(\frac{m d t^*}{M l^*} \right) - 0,6 \right)^2 - \frac{1}{(i^{**})} \left(\ln \left(\frac{m d t^{**}}{M l^{**}} \right) - 0,6 \right)^2 \right)} \right]^{\frac{1}{2}}}{4P_{п.д.кр} (\gamma + 1) D \left[\left(\mu_0 \pi (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) K \left(\frac{r_{сп}}{r} \right) \right) \right]}$$

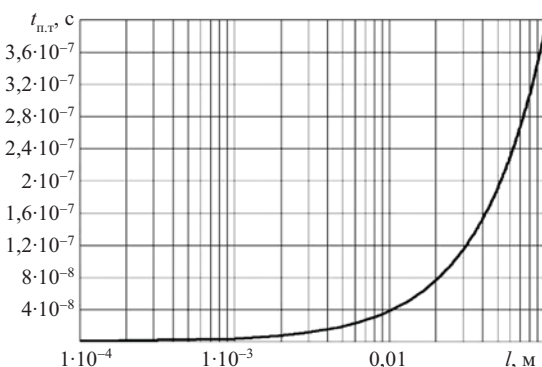


Рис. 4. Зависимость времени существования паузы тока от длины медного ЭВП радиусом $r_0 = 0,08$ мм

На рис. 4 и 5 представлены зависимости длительности паузы тока для медного и свинцового ЭВП радиусом $r_0 = 0,08$ мм (условие реализации быстрого механизма электрического взрыва) от длины ЭВП. Источником тока являлся СВМГ, параметры которого выбирались из условия реализации механизма быстрого электрического взрыва (взрывообразное разрушение металлов при прохождении импульса тока большой плотности ($j \approx 10^8$ А / см²)).

Анализируя зависимости, представленные на рис. 4 и 5, необходимо заметить, что, варьируя длину и материал ЭВП, можно изменять длительность паузы тока (время срабатывания ключа) от наносекундного (для $l < 0,025$ м) до микросекундного (для $l > 0,025$) диапазонов.

Таким образом, учитывая полученные зависимости для длительности паузы тока, можно сделать вывод о применимости явления вторичного пробоя продуктов детонации при электрическом взрыве легкоплавких проводников для создания быстродействующих ключей (см. рис. 4). При этом время срабатывания каждого ключа, определяемое длительностью первого и второго этапов электрического взрыва предыдущего ЭВП, можно варьировать в широком диапазоне путем изменения длины и материала легкоплавкого проводника.

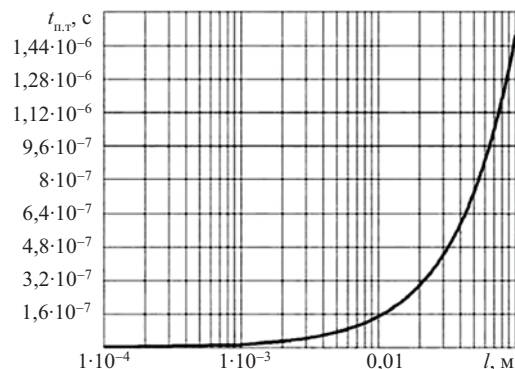


Рис. 5. Зависимость времени существования паузы тока от длины свинцового ЭВП радиусом $r_0 = 0,08$ мм

Библиографические ссылки

1. Кравченко В. И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / под ред. В. И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1987. – 256 с.
2. Бурцев В. А., Калинин И. В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 342 с.
3. Возможные сценарии развития вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников в вакууме и воздухе / С. И. Ткаченко, А. Р. Мингалеев, Романова [и др.] // Материалы науч.-коорд. сессии «Исследования неидеальной плазмы» под рук. академика В. Е. Фортова. – М. : ОИВТ РАН, 2007. – С. 46–52.
4. Там же.
5. Зонтова Т. В., Кучер Д. Б. Длительность механизма быстрого электрического взрыва проводников под воздействием токов спирального взрывомагнитного генератора // Збірник наукових праць Академії ВМС імені П. С. Нахімова.

6. Зонтова Т. В., Кучер Д. Б. Использование явления вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников для формирования мощных полиимпульсных излучений // Системи обробки інформації.– 2012. – Вип. 3(101), т. 2. – С. 73–78.
7. Там же.
8. Кравченко В. И. Указ. соч.
9. Бурцев В. А., Калинин И. В. Указ. соч.
10. Возможные сценарии развития вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников в вакууме и воздухе.
11. Зонтова Т. В., Кучер Д. Б. Длительность механизма быстрого электрического взрыва проводников под воздействием токов спирального взрывомагнитного генератора.
12. Зонтова Т. В., Кучер Д. Б. Использование явления вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников для формирования мощных полиимпульсных излучений.

13. Там же.
 14. Зонтова Т. В., Кучер Д. Б. Длительность механизма быстрого электрического взрыва проводников под воздействием токов спирального взрывомагнитного генератора.
 15. Зонтова Т. В., Кучер Д. Б. Использование явления вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников для формирования мощных полиимпульсных излучений.
 16. Зонтова Т. В., Кучер Д. Б. Экспериментальные исследования паузы тока, возникающей после быстрого электрического взрыва легкоплавких проводников // Системы обработки информации. – 2012. – Вып. 6(104), т. 2. – С. 62–65.
 17. Зонтова Т. В., Кучер Д. Б. Длительность механизма быстрого электрического взрыва проводников под воздействием токов спирального взрывомагнитного генератора.
 18. Зонтова Т. В., Кучер Д. Б. Использование явления вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников для формирования мощных полиимпульсных излучений.

19. Зонтова Т. В., Кучер Д. Б. Длительность механизма быстрого электрического взрыва проводников под воздействием токов спирального взрывомагнитного генератора.
 20. Зонтова Т. В., Кучер Д. Б. Использование явления вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников для формирования мощных полиимпульсных излучений.
 21. Бурцев В. А., Калинин И. В. Указ. соч.
 22. Возможные сценарии развития вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников в вакууме и воздухе.
 23. Интерпретация экспериментальных данных по электрическому взрыву тонких проволочек в воздухе / С. А. Пикуз, Д. А. Ткаченко, Д. А. Барышпольцев [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33, вып. 15. – С. 47–55.
 24. Лебедев С. В., Савватимский А. И. Металлы в процессе быстрого нагревания электрическим током большой плотности // Успехи физических наук. – Вып. 2, т. 144. – С. 215–248.

Получено 24.11.2016

УДК 629.73(045)

I. N. Ibrahim, Postgraduate, Kalashnikov ISTU

MODELING AND PREDICTIVE CONTROL OF NONLINEAR COUPLED AND UNDERACTUATED DYNAMICS OF A HEXACOPTER

Introduction

Nowadays, reducing the human factor in flights is a common topic in aerospace applications, for making the loss of human lives and economic costs as low as possible. As a consequence of this pursuit, there is an overwhelming interest in the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). When there are sufficient measurements the necessary states of an autonomous aerial vehicle can be estimated via the Kalman Filter (KF) [1]. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) fly at very low speeds and Reynolds numbers, have nonlinear coupling and tend to exhibit time-varying characteristics [1]. In order to control such vehicles it becomes necessary to design and develop robust and adaptive controllers and hence, identify the system. State and parameter estimation, which are an integral part of system identification, has been carried out on various flight data and simulations as evident from literature [2]. Some researchers, presented attitude estimation algorithms based on Kalman filter such as SAKF [3] and RAKF [4], for UAV problems when noise statistical characteristics are unknown, and time-varying vibrations are the main disturbance source, also for problems against sensor/actuator fault of the system. Others papers presented the sliding mode and high-order sliding mode respectively like an observer [5, 6] in order to estimate the unmeasured states and the effects of the external disturbances such as wind and noise. In [7], the unknown parameter of the quadrotor are identified using state estimation method with the implementation of Unscented Kalman Filter (UKF). Most researchers used

estimation techniques to identify the parameters in unknown systems, while some researchers [8, 12, 14] mentioned estimation in order to predict the signals. The main objective is to estimate the altitude of the UAV, in order to use this estimated value as predictive feedback signals for UAV altitude stabilization. This value cannot be estimated using a single sensor because the fact that each sensor has its own problem [8]. The performance of the proposed KF is investigated using simulation for state estimation procedure of an Unmanned Aerial Vehicle [4, 8]. The paper proceeds as follows. In Section 2 the flight dynamics model of the UAV is given. In Section 3, UAV state estimation and predictive control are proposed. In Section 4, the simulation is carried out followed by a discussion. Section 5, gives a brief summary of the obtained results and concludes the paper.

The UAV dynamics

Newton-Euler equations were used. In order to make the modeling, some assumptions have been made, taking into consideration that the hexacopter is a rigid body and has a symmetrical structure. The motion can be decomposed into translational and rotational components. Therefore, the equations with respect to the body frame are as derived in [9] and [10]:

$$\begin{cases} \dot{u} = -\frac{k_t}{m}u + g \cdot \sin \theta - (qw - vr) + \frac{F_{d1}}{m} \\ \dot{v} = -\frac{k_t}{m}v - g \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta - (ru - pw) + \frac{F_{d2}}{m} \\ \dot{w} = \sum_{i=1}^6 |T_i| - \frac{k_t}{m}w - g \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta - (pv - qu) + \frac{F_{d3}}{m} \end{cases} \quad (1)$$