

M. P. Belov, D. D. Truong
Saint Petersburg Electrotechnical University

OPTIMAL QUADRATIC CONTROL OF EXOSKELETON KNEE ELECTRIC DRIVES WITH ELASTIC COUPLINGS

This article builds a mathematical model for an exoskeleton electric drive system with elastic bonds using the optimal quadratic control (LQR) method. Unlike traditional hard drives, important features of an elastic drive are: stability control, lower output impedance, impact resistance and better energy storage. Based on a mathematical model of an electric drive with elastic connections of an exoskeleton knee joint, a LQR control method is proposed in order to provide the human leg moment with a given moment value. The exoskeleton is designed to support people with disabilities. The exoskeleton electric drive system is a complex system requiring high accuracy to ensure the disabled have a stable movement. The complexity of such systems lies in the elasticity of mechanical bonds, due to which self-oscillation occurs in the transition process of the system, which ultimately leads to complete instability of the operation of exoskeleton electric drives. The modern approach to solving complex problems is the optimal quadratic control. The use of a stable and efficient LQR management method is warranted. The results of the study are confirmed by modeling in the environment of Matlab & Simulink.

Exoskeleton, electric drive, optimal quadratic control, optimal controller, elastic transmission, elastic coupling, LQR

УДК 621.365.5

В. Д. Гончаров, Р. В. Яшкардин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Энергетический баланс мощной импульсной технологической установки

Представлены результаты определения энергетического баланса мощной импульсной технологической установки. Показано, что используя схему замещения установки, можно с достаточной точностью рассчитать энергетический баланс. Значения параметров для всех элементов схемы замещения определялись при помощи измерения их частотных характеристик. При расчетах энергетического баланса мощных импульсных систем необходимо учитывать потери в конденсаторных батареях. Показано, что основные энергетические потери в установках подобного типа связаны с токами, протекающими по протяженным электродам и по системе подключения этих электродов к конденсаторной батарее. При этом импульсные токи занимают лишь малую часть сечения проводника, что связано с глубиной проникновения импульсной электромагнитной энергии в проводящие материалы. В результате сопротивление электродов при протекании импульсных токов оказывается во много раз выше, чем его значение на постоянном токе.

Энергетический баланс, импульс, схема замещения

Мощные импульсные воздействия широко используются в разных областях науки и технологии – электроимпульсном разрушении материалов при добыче ископаемых [1]; электроразрядных технологиях для дезинтеграции и раскрытия руд, выделения оgranочного сырья кристаллов [2], [3], разрушения бетона и железобетонных конструкций [4], утилизации композитных материалов и изделий [5], импульсных режимах получения наноматериалов [6], импульсных техноло-

гических установках для обеззараживания питьевой и сточных вод, текучих пищевых продуктов [7] и т. д.

Один из способов получения наноматериалов основан на диспергировании материалов протяженных электродов под действием мощного импульсного разряда, который движется по их поверхности [8]. Для эффективного использования оборудования, которое реализует данный способ, необходимо определить его энергетический ба-

ланс, т. е. реальные затраты энергии, которая выделяется в технологическом устройстве, а также ее потерь в различных частях этого устройства. Определение этого баланса должно опираться на подробные исследования электромагнитных параметров системы.

Однако определение электромагнитных параметров подобных систем – исключительно сложная задача, что во многом сдерживает развитие данной технологии. Это относится не только к определению пространственного распределения напряженностей электрического и магнитного поля, но и к напряжениям и токам, протекающим в системе. Подобная ситуация связана с тем, что в сильных, быстро изменяющихся во времени ЭМ-полях:

1) велика вероятность «наводок» с их стороны на само измерительное оборудование и провода, которыми оно связано с объектом измерения;

2) сложно аппаратное измерение больших импульсных токов;

3) затруднено проведение измерений напряжений непосредственно в области, где выделяется энергия, в результате чего измеренные значения напряжения могут существенно отличаться от реальных на самом технологическом объекте.

Для измерения импульсных токов в большинстве случаев используются разного рода шунты. Проблема в том, что любой шунт кроме резистивной составляющей имеет и индуктивную, а также что при изменении тока во времени изменяется и сечение, по которому протекает ток (глубина проникновения), а следовательно, и сопротивление шунта. В большинстве случаев результаты напряжений на шунте необходимо пересчитывать, что возможно только с помощью численного моделирования электромагнитных полей. Разработка и создание подобных шунтов – сложнейшая задача, решению которой для проблемно-ориентированного случая посвящена диссертация [8]. Однако и в этом случае адекватность измеряемых токов требует доказательств.

Именно поэтому появилась данная статья, цель которой – определение энергетического баланса мощной импульсной технологической установки и выработка рекомендаций по увеличению эффективности ее работы.

Конструкция технологической установки во многом повторяет классический рельсотронный ускоритель. При работе этой установки (рис. 1) предварительно накопленная энергия (W_0)

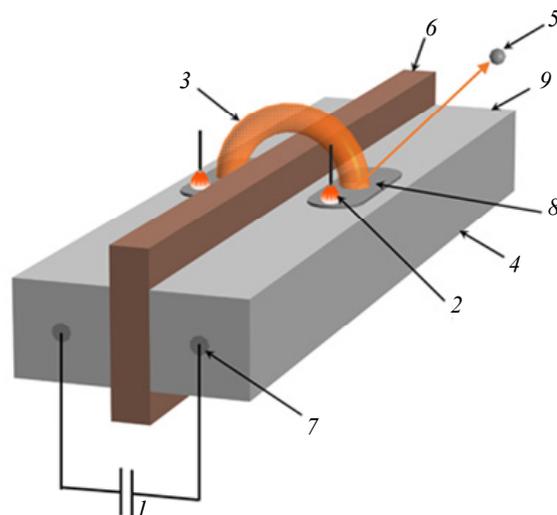
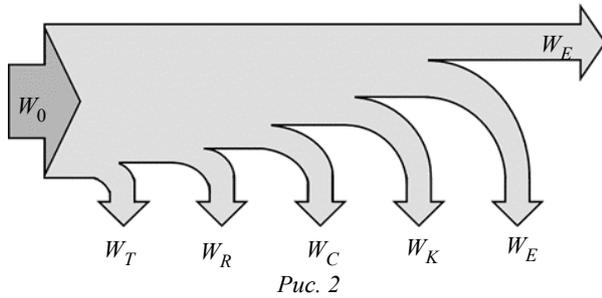


Рис. 1

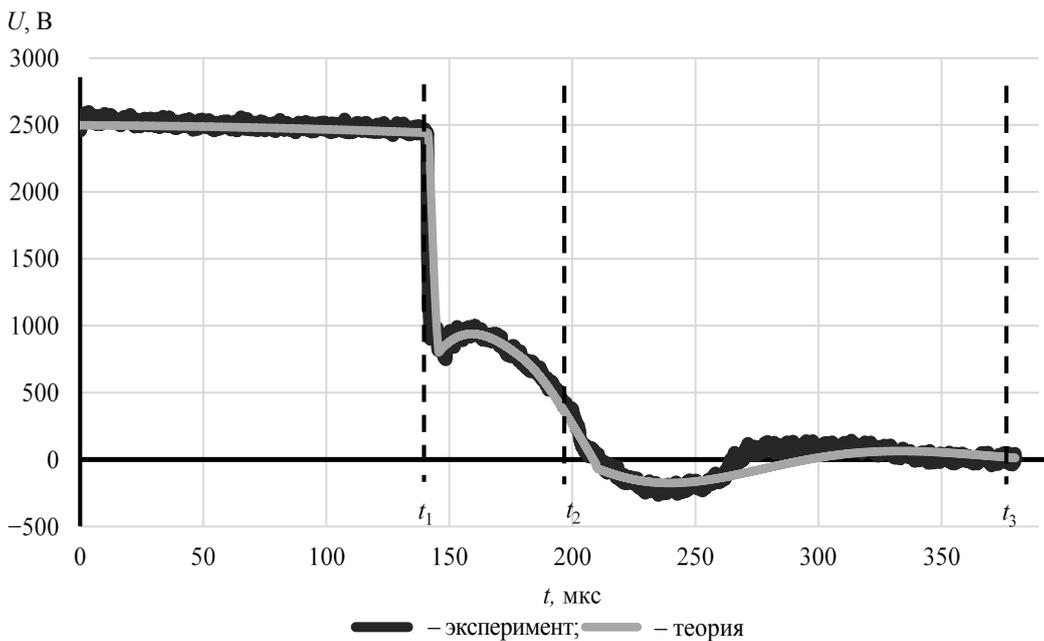
в конденсаторной батарее (I) тратится на формирование области горения разряда (2), которая формируется за счет предыонизации приэлектродных промежутков, и горение этого разряда (3), который перемещается при этом по поверхности протяженных электродов (4). Токи, протекающие в системе, достигают нескольких десятков килоампер (I_{\max}). Взаимодействие этих токов приводит к возникновению больших усилий, воздействующих на электроды, которые по этой причине выполняются из немагнитной стали. Энергия, выделяемая в плазме разряда (W_P), идет на диспергирование материала электродов (5), разогрев и уменьшение размеров диспергируемых частиц. Горящий разряд имеет форму плазменного «шнура», замыкающегося над диэлектрической вставкой (6). Разряд движется в направлении от места подвода питания (7) за счет взаимодействия магнитных полей тока в электродах и в плазме разряда. Воздействие разряда на электроды приводит к их оплавлению (8). Именно отношение энергии W_P к предварительно накопленной энергии определяет эффективность использования энергии в установке, ее КПД. При передаче энергии возможны непроизводительные потери на зажигание разряда W_R , в конденсаторной батарее W_C , в коаксиальном кабеле, связывающем конденсаторную батарею с рабочими электродами W_K , при протекании тока по самим рабочим электродам W_E . Очевидно, что часть энергии W_P тратится на непроизводительные потери (W_T). Это прежде всего относится к ее потерям за счет излучения плазменного

столба и на нагрев и оплавление электродов. Эти потери можно оценить, не прибегая к измерениям электромагнитных параметров. Распределение энергии в системе схематично приведено на рис. 2.



Проще всего измерить напряжение на электродах, однако даже в этом случае возможны проблемы, связанные с необходимостью «развязки» питания осциллографа от сети, которая позволяет уменьшить влияние помех, возникающих в сети под действием мощного ЭМ-импульса, на результаты измерений. Для того чтобы избежать этих проблем, питание осциллографа осуществлялось через трансформатор с коэффициентом трансформации один к одному. Такое включение дало возможность измерить напряжения на отдельных элементах установки. Наибольший интерес представляет напряжение на плазме разряда. Оно измерялось путем подключения к электродам, к которым не подключено питание (9 на рис. 1). Поскольку по этой части протяженных электродов не протекает ток, при таком подключении осциллограф показы-

вает именно напряжение на плазме. Типичная осциллограмма напряжения на электродах приведена на рис. 3. В процессе проведения экспериментов предварительно проводилась зарядка конденсаторной батареи, емкость которой в экспериментах изменялась от 100 до 1000 мкФ. Напряжение заряда U_0 контролировалось с точностью $\pm 1\%$. В момент времени $t = 0$ происходит зажигание вспомогательного разряда. В промежутке времени t от 0 до t_1 энергия (W_R) расходуется на формирование приэлектродных областей, на нагрев и ионизацию газоразрядного промежутка. В течение этого времени напряжение на электродах изменяется от значения U_0 до промежуточного $U_{пр}$. В момент времени t_1 происходит замыкание электродов основного разряда через сформированный плазменный сгусток, формируется ток основного разряда (i). Этот плазменный сгусток перемещается по электродам в направлении от точек, к которым подключена конденсаторная батарея (7 на рис. 1). В момент времени t_2 происходит переход от одной формы к другой [8], который приводит к скачкообразному изменению сопротивления плазмы. При этом оказалось, что промежуток времени $\Delta t = (t_2 - t_1)$ составлял 50 ± 2 мкс при широком изменении параметров установки. Процесс перемещения плазменного сгустка по электродам проходит до момента времени t_3 , когда разряд «гаснет». Во время протекания тока основного разряда часть энергии теряется в конденсаторной батарее, внутреннее сопротивление



которой достигает 5 мОм. Основная часть тока протекает по частям электродов, расположенным в непосредственной близости друг от друга.

Анализ процессов, которые происходят в технологической системе, удобно проводить, используя ее схему замещения. Плазменный сгусток представляет собой ограниченную по размерам область, по которой протекает ток разряда. Эту область можно приближенно заменить схемой замещения, состоящей из последовательно соединенных резистивного (R_2), индуктивного (L_2) элементов и источника противо ЭДС, с помощью которого можно описать приэлектродные процессы в разряде [10]. Сопротивление R_2 в момент времени t_2 изменяется скачком (изменение формы разряда). При этом значение сопротивления R_2 до момента t_2 практически не зависело от параметров системы и составляло 0.04...0.035 Ом. После перехода разряда в другую форму это сопротивление необходимо было изменить. Здесь, для того чтобы получить напряжение на разряде, близкое к реальному, это сопротивление необходимо было уменьшить до 0.003...0.001 Ом. Отрезок коаксиального кабеля и часть электродов, по которым протекает ток разряда, можно заменить резистивными R_1 и R_3 и индуктивными L_1 и L_3 элементами соответственно. При этом импульсный ток занимает лишь малую часть сечения проводника, что связано с глубиной проникновения импульсной электромагнитной энергии в проводящие материалы. В результате сопротивление электродов при протекании импульсного тока оказывается во много раз выше, чем его значение на постоянном токе.

Сопротивление межэлектродной емкости в исследуемом частотном диапазоне (до 10^5 Гц) оказывается на несколько порядков выше любого из сопротивлений рассматриваемых элементов. Это позволило не учитывать данную емкость, включенную параллельно электродам. В результате, в схеме замещения все описанные элементы оказались соединены последовательно (рис. 4). Это значительно упрощает расчет энергии, которая выделяется в каждом из них. В [8] представлены значения всех элементов схемы замещения. Конденсаторную батарею при расчете энергетического баланса можно также представить последовательно соединенными суммарной емкостью C_Σ и сопротивлением R_Σ . Данные по значениям параметров отдельных элементов схемы замещения, за исключением параметров плазмы, были получены измерением частотных характеристик этих элементов в диапазоне 10...10⁶ Гц.

Изменение сопротивления плазмы в момент времени t_2 в программе происходит плавно за время 10^{-6} с.

Сравнение типичных результатов измерений и моделирования процессов в схеме замещения, приведенное на рис. 3 для напряжения на разряде, свидетельствует о том, что предложенная модель достаточно точно описывает процессы в установке.

При расчетах энергии использовались следующие формулы:

$$W_0 = \frac{CU_0^2}{2}; \quad W_R = \frac{C(U_0^2 - U_{пр}^2)}{2};$$

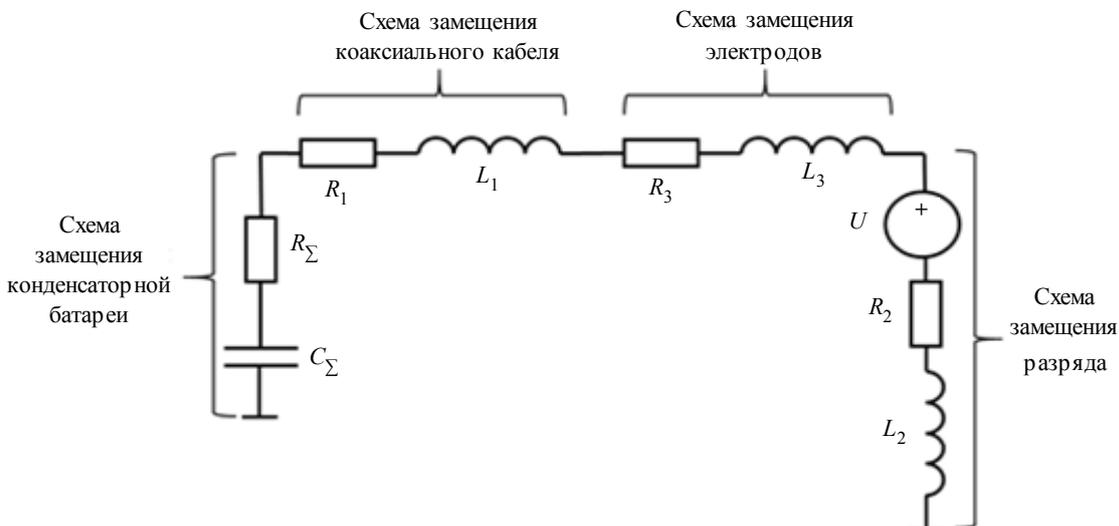


Рис. 4

U_0 , В	U_{np} , В	I_{max} , кА	W_0 , Дж	W_C , Дж	W_R , Дж	W_K , Дж	W_E , Дж	W_T , Дж	W_p , Дж	ΔW , Дж
2000	1919	17.5	1000	18	79	130	559	20	254	56
2000	1928	17.5	1000	20	70	140	503	20	270	25
2500	2443	18	1562	88	70	144	698	30	552	50

$$W_P = \int_0^{t_u} i^2 R_2 dt; \quad W_K = \int_0^{t_u} i^2 R_1 dt;$$

$$W_E = \int_0^{t_u} i^2 R_3 dt; \quad W_C = \int_0^{t_u} i^2 R_{\Sigma} dt.$$

Оценка части непроизводительных тепловых потерь, которые идут на нагрев и оплавление электродов, выполнялась с учетом геометрии нагретой и оплавленной области. Эти потери в зависимости от напряжения заряда конденсаторной батареи составляли от 10 до 25 Дж. В тех же пределах находятся и потери излучением, если рассматривать плазму, температура которой не превышает 120 000 °С, как абсолютно черное тело. В действительности эти цифры показывают верхний предел потерь и составляют от 1 до 2 % от значения накопленной энергии.

Полученные результаты расчетов приведены в таблице, где ΔW – разность энергии, предварительно запасенной в конденсаторной батарее, и расчетных значений суммарного ее расходования. Расчетные данные свидетельствуют о высокой точности результатов, которые получены на использованной схеме замещения реальной технологической установки.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что значительная часть энергии непроизводительно тратится на нагрев электродов W_E и коаксиального кабеля W_K . В этих элементах теряется более 50 % предварительно запасенной энергии. Во время импульса в самой конденсаторной батарее выделяется от 5 до 7 % от энергии, которая в ней была предварительно запасена.

Выводы:

- Анализ распределения энергии в технологической системе можно проводить, используя схемы замещения ее отдельных элементов.
- При расчетах энергетического баланса мощных импульсных систем необходимо учитывать потери в конденсаторных батареях.
- В традиционной конструкции рельсотронного ускорителя значительная часть энергии непроизводительно расходуется на потери в самих «рельсах» и в системе подключения к конденсаторным батареям.
- Для увеличения эффективности работы технологической установки необходимо подключить электроды непосредственно к конденсаторной батарее и использовать электроды, выполненные из меди, введя дополнительные диэлектрические «ребра жесткости» в систему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усов А. Ф., Потокин А. С., Ильин Д. В. Исследование методов энергетической оптимизации технологического использования разрядно-импульсной низкотемпературной плазмы в конденсированных средах // РАН. Тр. Кольского науч. центра. 2016. № 5 (39). С. 7–17.
2. Andres U. Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses // Int. J. of Mineral Processing. 2010. 97. P. 31–38.
3. Wang E., Shi F., Manlapig E. Mineral liberation by high voltage pulses and conventional comminution with same specific energy levels // Minerals Engineering. 2012. № 27–28. P. 28–36.
4. Linb E., Mueller A. High-performance sonic impulses – an alternative method for processing of concrete // Int. J. Miner. Process. 2004. 74S. P. 199–208.
5. Liberation of valuable materials in waste printed circuit boards by highvoltage electrical pulses / C. L. Duan, Z. J. Diao, Y. M. Zhao, W. Huang // Minerals Engineering. 2015. 70. P. 170–177.
6. Смирнов Б. М. Импульсный режим образования фрактальных нитей // ЖЭТФ. 2016. Т. 150, вып. 5 (11). С. 886–895.
7. Гашимов А. М., Гурбанов Э. Д. Разработка высоковольтных импульсных установок и обеспечение мер безопасности при их эксплуатации // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2016. № 2. С. 95–105
8. Наталинова Н. М. Исследование резистивных преобразователей для компьютерных систем измерения токов сложной формы в составе технологических установок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.01. Томск, 2009.
9. Гончаров В. Д., Калинин С. А., Яшкардин Р. В. Определение параметров плазмы с использованием схемы замещения импульсного разряда // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. Вып. 5. С. 3–7.
10. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Наука, 1992.

V. D. Goncharov, R. V. Yashkardin
Saint Petersburg Electrotechnical University

THE ENERGY BALANCE OF A POWERFUL PULSE TECHNOLOGICAL INSTALLATION

The paper presents the results of determining the energy balance of a powerful pulse technological installation. It is shown that the energy balance may be calculated with sufficient accuracy using the equivalent circuit of the installation. The parameter values for all elements of the equivalent circuit were determined by measuring their frequency characteristics. It is necessary to consider the energy losses in capacitor batteries when calculating the energy balance of powerful pulse systems. It is shown that the main energy losses in this type of installations are associated with currents flowing through elongated electrodes and through the system of connecting these electrodes to a capacitor battery. In this case, pulsed currents occupy a small part of the conductor cross-section. This is due to the depth of penetration of pulsed electromagnetic energy into conductive materials. As a result, the electrodes resistance during the flow of pulse currents is many times higher than its value at the direct current.

Energy balance, pulse, equivalent circuit
